

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra Energetiky

Návrh úpravy fluidního kotle K5 v Teplárně

Olomouc pro snížení NO<sub>x</sub>

Proposal of Reconstruction of Fluidized  
Boiler K5 in Olomouc Heat Plant to Reduce  
NO<sub>x</sub> Emissions

Student:

Bc. Michal Jiříček

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

Ostrava 2016

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Jiříček**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení  
Téma: **Návrh úpravy fluidního kotle K5 v Teplárně Olomouc pro snížení emisí NO<sub>x</sub>**  
**Proposal of Reconstruction of Fluidized Bed Boiler K5 in Olomouc Heat Plant to Reduce NO<sub>x</sub> Emissions**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

Navrhnete zařízení pro denitrifikaci spalin metodou SNCR pro fluidní kotle K5 v Teplárně Olomouc spalující hnědé uhlí. Podmínkou je dosažení emisních parametrů NO<sub>x</sub> 190 mg/m<sup>3</sup>. Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši současných možností denitrifikace spalin pro kotle tohoto typu.
2. Vypracujte popis spalovacího zařízení a navrhnete vhodný způsob denitrifikace.
3. Proveďte výpočty hmotové bilance paliva, spalin a provozních hmot pro denitrifikaci.
4. Proveďte vyhodnocení teplotního a koncentračního měření ve spalovací komoře kotle a navrhnete vhodná místa pro instalaci vstřikovacích zařízení.
5. Vypracujte návrh denitrifikačního zařízení s ohledem na uspořádání teplárny.
6. Vypracujte výkres rozmístění vstřikovacích trysek na kotli a návrh konstrukčního uspořádání vstřikovací trysky s uchycením na kotli.

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [1]JANEBA,J.,KARTÁK, K., Výpočty kotlů a parogenerátorů. 1. vyd. Praha: ČVUT 1985 . 83 s  
[2]RAJNIAK, I. a kol. Tepelno-energetické a emisné merania, Istre Science, Bratislava 97. ISBN 80-88683-20-3  
[3]Zprávy katedry energetiky VŠB-TU Ostrava.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Bohumír Čech**

Datum zadání: 31.10.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016

  
prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě .....

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Adresa trvalého pobytu autora práce:

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

JIRÍČEK, M. *Návrh úpravy fluidního kotle K5 v Teplárně Olomouc pro snížení emisí  $NO_x$  : diplomová práce.* Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2016, 67 s. Vedoucí práce: Čech, B.

Tato diplomová práce se zabývá tvorbou škodlivin během spalovacího procesu a to konkrétně oxidů dusíku. Popisuje jednotlivé způsoby tvorby a typy oxidů dusíku. Představuje nejvýznamnější producenty, kteří se podílejí na tvorbě škodlivin. Popisuje řešení možných zařízení pro snížení emisí  $NO_x$  ze spalín. Porovnává jejich realizovatelnost, klady a zápory. V praktické části je zpracován návrh zařízení pro denitrifikaci spalín ve fluidním kotli o výkonu 141,3 MW s využitím metody SNCR.

## **ANNOTATION OF MASTER THESIS**

JIRÍČEK, M. *Proposal of Reconstruction of Fluidized Boiler K5 in Olomouc Heat Plant to Reduce  $NO_x$  Emissions : Master Thesis.* Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power engineering, 2016, 67 p. Thesis head: Čech, B.

This thesis deals with the production of the pollutants during the burning process, concretely within the combustion of the nitrogen oxides. It describes particular formation methods and types of nitrogen oxides. Thesis represents the major pollution producers. It also records the solutions of possible devices used for the flue gas emission minimization and compares their feasibility, pros-and-cons. The concept of the flue gas denitrification device in the fluid boiler with the duty of 141,3 MW is processed in the practical part. It uses the SNCR method.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Oxidy dusíku, tvorba oxidů dusíku, snižování emisí, fluidní kotel

## **KEYWORDS**

Nitrogen oxides, production of nitrogen oxides, elimination of emission, fluid boiler.

## *Poděkování*

Tuto práci by nebylo možné vypracovat bez pomoci pana doc. Dr. Ing. Bohumíra Čecha. Velké díky mu patří za ochotu, cenné rady a pomoc v průběhu práce. Stejně tak děkuji pracovníkům Teplárny Olomouc za pomoc při řešení tématu mé diplomové práce, především panu Ing. Botlíkovi za vstřícný přístup, poskytnutí podkladů. Tato diplomová práce vznikla s podporou infrastruktury centra ENET.

## Obsah

1. Úvod .....	8
2. Legislativní rámec .....	9
3. Oxidy dusíku.....	12
3.1 Tvorba NO <sub>x</sub> .....	12
3.1.1 Termické NO <sub>x</sub> .....	12
3.1.2 Palivové NO <sub>x</sub> .....	13
3.1.3 Promptní NO <sub>x</sub> .....	13
3.2 Hlavní faktory ovlivňující tvorbu NO <sub>x</sub> .....	13
4. Denitrifikace kotlů .....	14
4.1 Primární metody snižování emisí NO <sub>x</sub> .....	14
4.2 Sekundární metody snižování emisí NO <sub>x</sub> .....	14
4.2.2 SNCR.....	14
4.2.3 SCR.....	29
5. Návrh technologie snižování emisí NO <sub>x</sub> fluidního kotle K5 .....	38
5.1 Obecný postup návrhu technologie SNCR .....	41
5.2 Provozní měření kotle.....	42
5.3 Volba reagentu pro fluidní kotel K5 .....	45
5.4 Určení vstřikovacích míst .....	46
5.5 Objemy spalin.....	50
5.5.1 Teoretické množství vzduchu .....	50
5.5.2 Stechiometrické objemy vzniklých spalin při spálení 1 [kg] paliva.....	53

5.5.3 Objem vodní páry ve spalínách .....	54
5.5.4 Teoretické množství vlhkých spalín .....	54
5.1.1 Výrobní teplo páry, množství paliva a celkové množství vzniklých spalín 55	
5.6 Skladování čpavkové vody .....	56
5.6 Potrubní trasy čpavkové vody do kotelny a vstříkovací moduly .....	58
5.7 Řídicí systém .....	58
5.7 Návrh kopí a ochrana prostupů kopí do prostoru spalovací komory .....	58
6. Závěr .....	60
Literatura .....	61
Seznam tabulek .....	63
Seznam obrázků .....	64
Zkratky .....	68
Přílohy diplomové práce .....	69



## 1. Úvod

Teplárna Olomouc je součástí společnosti Veolia Energie ČR a.s. Teplárna prostřednictvím svých dvou zdrojů tepla (Teplárny Olomouc a Špičkové výtopny Olomouc) zabezpečuje prostřednictvím své parní a horkovodní tepelné soustavy CZT potřeby tepla města Olomouce. Délka parní horkovodní sítě je okolo 100 km. Teplárna Olomouc je základním zdrojem tepla. Na teplárně jsou instalovány dva uhelné kotle a to fluidní kotel K5 spalující hnědé uhlí a práškový granulační kotel K3 spalující černé uhlí z OKD. Na Špičkové výtopně Olomouc jsou provozovány tři kotle na ušlechtilá paliva a to kotle K11, K12 spalující těžké topné oleje a kotel K13, který může spalovat těžké topné oleje nebo ZP. Špičková výtopna Olomouc je v současné době provozována minimálně a jak už naznačuje její název, jedná se o špičkový a havarijný zdroj tepla města Olomouce.

Teplárna Olomouc je zařazena v národním přechodovém plánu, okolo roku 2019 přestane plnit stanovené emisní stropy a hlavní výrobní zařízení teplárny bude muset být doplněno o další technologie snižující emise, zejména emise  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  a tuhých částic.

V rámci své diplomové práce jsem si jako téma vybral aplikaci technologie SNCR na fluidní kotel K5. Diplomovou práci jsem realizoval na úrovni prefeasibility study.

Smyslem diplomové práce bylo získat základní teoretické a praktické zkušenosti z aplikací technologie SNCR na fluidních a práškových kotlích. Diplomová práce má níže uvedené cíle:

- rešerši dostupné literatury vztahující se k dané problematice
- získání základních dovedností vztahujících se k provozním a experimentálním měřením
- získání základních projekčních návyků
- získání dovedností v oblasti procesních výpočtů
- zvládnutí basic designu technologie SNCR v rozsahu:
  - rozmístění trysek
  - výpočet objemů spalin
  - PI diagram technologie
  - dispoziční řešení a návrh hlavních tras
  - atd.

## 2. Legislativní rámec

Ovzduší je jednou z nejdůležitějších složek životního prostředí. Vdechovaný vzduch se dostává do nitra lidského těla a přímo tak působí na zdraví člověka. S ohledem na tuto skutečnost je na úrovni ČR a EU věnována velká pozornost.

V devadesátých letech minulého století prošly velké zdroje znečišťování rozsáhlými rekonstrukcemi, v rámci kterých byly budovány:

- nové fluidní kotle (ČEZ, Kladno, Zlín apod.)
- mokré odsiřovací jednotky
- odprášení kotlů
- primární opatření II. generace

Na základě těchto patření došlo k výraznému zlepšení životního prostředí.

Ministerstvo životního prostředí v roce 2007 zpracovalo Národní program snižování emisí ČR. Tento dokument, schválený vládou obsahuje několik klíčových opatření, která přispívají ke zlepšení současného stavu ŽP.

Základním právním předpisem v oblasti ochrany ovzduší je zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší a zákon č. 73/2012 Sb., o látkách, které poškozují ozonovou vrstvu, a o fluorovaných skleníkových plynech. Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, stanoví zejména práva a povinnosti provozovatelů zdrojů znečišťování ovzduší, nástroje ke snižování množství látek, které znečišťují ovzduší, působnost správních orgánů a opatření k nápravě a sankce. Zákon č. 201/2012 Sb. byl novelizován zákonem č. 64/2014 Sb. (s účinností od 1.5.2014) a zákonem č. 87/2014 Sb. (s účinností od 1.6.2014).

Zákonem č. 73/2012 Sb., o látkách, které poškozují ozonovou vrstvu, a o fluorovaných skleníkových plynech se není nutné se v rámci řešené problematiky zabývat.

Řada povinností v oblasti ochrany ovzduší má svůj základ v předpisech Evropské unie. Jedním z nejdůležitějších je rámcová směrnice 2008/50/ES o kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduší pro Evropu. Dalším podstatným předpisem je směrnice 2010/75/EU o průmyslových emisích [14].

V tab. 1.1. jsou uvedeny současné a budoucí emisní limity fluidního kotle K5.

Tab. 1.1. Současné a budoucí emisní limity fluidního kotle K5 mg/m<sub>n</sub><sup>3</sup>

Emise	Stávající emisní limit (celoroční provoz)	Nový emisní limit (celoroční provoz)
SO <sub>2</sub>	500	200
NO <sub>x</sub>	400	200
TZL	50	25

Zdroj: Integrované povolení a legislativa

Tyto emisní limity by kotel K5 musel plnit od 1.1.2016, pokud by teplárna nebyla zařazena v Národním přechodovém plánu. Tento Národní přechodový plán za podmínky průběžného snižování emisních stropů zdrojů umožňuje provozovatelům dílčí odklad ekologizovat své zdroje a to nejpozději do 30.6.2020.

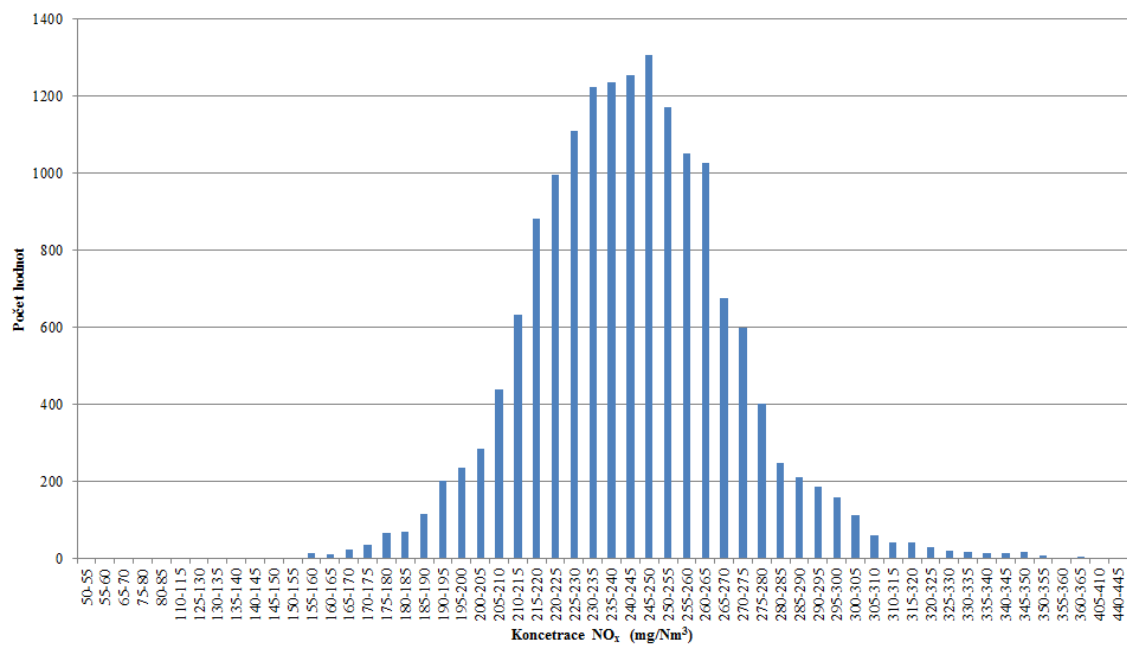
V tabulce 1.2 jsou uvedeny stávající emise kotle K5 v letech 2013 – 2015

Tab. 1.2: Průměrné roční emise v mg/Nm<sup>3</sup>

Emise/rok	2013	2014	2015
TZL	18,93	13,41	13,28
SO <sub>2</sub>	484,15	488,69	484,540
NO <sub>x</sub>	279,64	256,26	243,95
CO	13,420	13,21	13,470

Zdroj: Výkaz škodlivin a provozu odlučovacích zařízení

Histogram emisí  $\text{NO}_x$  fluidního kotle K5 je na obr. 1.1.



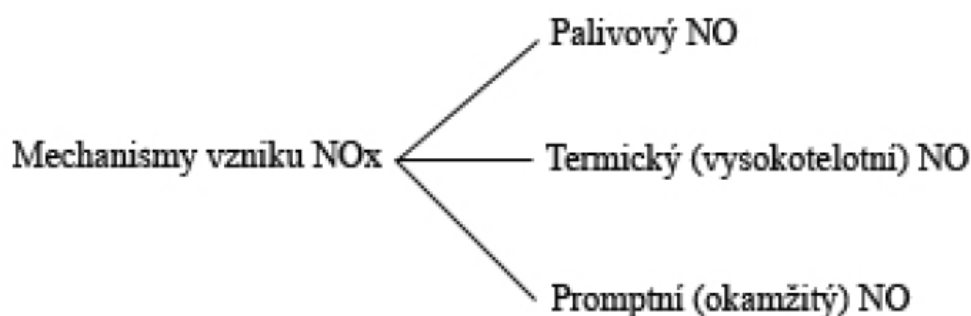
Obr.1.1 Histogram emisí  $\text{NO}_x$  kotle K5

### 3. Oxidy dusíku

Jak již bylo napsáno v úvodu, diplomová práce se bude zabývat problematikou snižování emisí  $\text{NO}_x$ . Mezi oxidy dusíku patří oxid dusný ( $\text{N}_2\text{O}$ ), oxid dusnatý ( $\text{NO}$ ), oxid dusitý ( $\text{N}_2\text{O}_3$ ), oxid dusičitý ( $\text{NO}_2$ ) a ( $\text{N}_2\text{O}_5$ ). Z hlediska emisí je nejvýznamnější oxid dusný ( $\text{N}_2\text{O}$ ), oxid dusnatý ( $\text{NO}$ ) a oxid dusičitý ( $\text{NO}_2$ ), které souhrnně označujeme jako  $\text{NO}_x$ . Na emisích  $\text{NO}_x$  se jednotlivé složky podílejí následovně:  $\text{NO}$  90 – 99 %,  $\text{NO}_2$  1 – 10 % a  $\text{N}_2\text{O}$  do 1%. Tyto podíly jsou ovlivňovány zejména druhem spalovaného paliva a samotným spalovacím procesem.

#### 3.1 Tvorba $\text{NO}_x$

Rozeznáváme tři základní mechanismy vzniku  $\text{NO}_x$  při spalování fosilních paliv. Tyto mechanismy jsou uvedena na obr. 3.1.



*Obrázek 3.1 - Mechanismy vzniku  $\text{NO}_x$*

Všechny tři tyto mechanismy vzniku mají na celkovém množství  $\text{NO}_x$  rozdílný podíl, z nichž dominantní část je vytvořena z palivových  $\text{NO}_x$  a naopak zanedbatelná část z promptních  $\text{NO}_x$ . Jednotlivé mechanismy jsou pak popsány v dalších kapitolách.

##### 3.1.1 Termické $\text{NO}_x$

Tyto oxidy dusíku vznikají oxidací dusíku obsaženého ve spalovacím vzduchu, tato oxidace je ovšem podmíněna vyšší teplotou, která je nezbytná k rozštěpení jeho atomů. Počátek vzniku termických  $\text{NO}_x$  je mezi teplotami 1000 a 1100 °C ovšem s dalším nárůstem teploty výrazně stoupají a zhruba od teplot pohybujících se okolo 2 000 °C se jejich postavení stává dominantní na celkové produkci  $\text{NO}_x$  při spalování. Dalším významným kritériem, kterým jsou termické  $\text{NO}_x$  ovlivňovány, je doba jejich setrvání ve

spalovacím prostoru. Z výše uvedených informací je tedy patrné, že u ohnišť s nižšími teplotami ve spalovacím prostoru jako jsou například fluidní ohniště, nebudou mít zásadní postavení na celkové produkci  $\text{NO}_x$  a naopak u ohnišť překračující hranici 2 000 °C se stávají zásadní.

### **3.1.2 Palivové $\text{NO}_x$**

Jedná o oxidy dusíku vzniklé oxidací dusíku vázaného v palivu. Tyto oxidy jsou pak během spalovacího procesu uvolňovány a vypouštěny do ovzduší společně s dalšími produkty spalování. Při spalování uhlí mohou tvořit až 80 % celkové produkce  $\text{NO}_x$ . Podíl palivových  $\text{NO}_x$  můžeme tedy snížit výběrem paliva s nižším obsahem dusíkatých látek. To ovšem není tak jednoduché, jelikož při výběru paliva jsme ovlivňováni řadou dalších kritérií.

### **3.1.3 Promptní $\text{NO}_x$**

Promptní  $\text{NO}_x$  vznikají, že na rozhraní plamene pomocí meziproductů dochází k radikálovým reakcím, pomocí kterých je přeměňován molekulární dusík a to vše za přítomnosti uhlovodíků.

## **3.2 Hlavní faktory ovlivňující tvorbu $\text{NO}_x$**

Mezi základní faktory ovlivňující tvorbu  $\text{NO}_x$  patří:

- teplota spalin
- reakční doba
- poměr palivo/vzduch
- chemické složení paliva

## **4. Denitrifikace kotlů**

U současných aplikací se používá kombinace primárních a sekundárních metod.

### **4.1 Primární metody snižování emisí NO<sub>x</sub>**

Primární metody jsou založeny zejména na:

- instalaci nízkoemisních hořáků
- postupném přívodu spalovacího vzduchu
- reburningu
- spalování s nižšími přebytky vzduchu
- atd.

S ohledem na téma diplomové práce se detailněji primárními opatřeními zabývat nebudu.

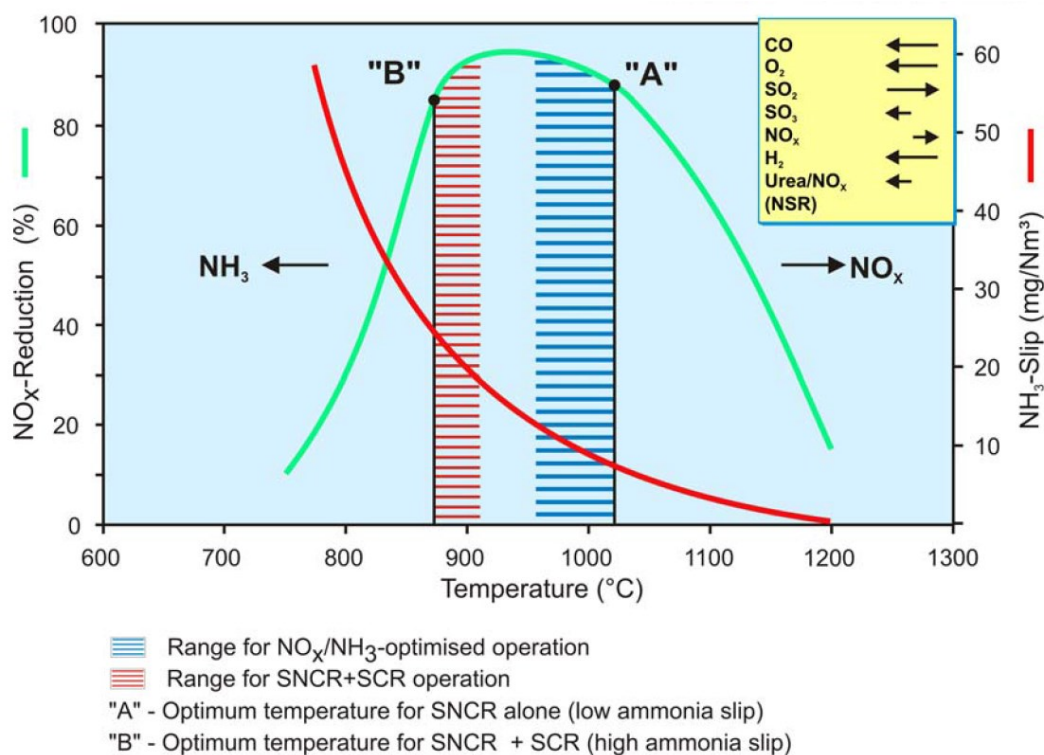
### **4.2 Sekundární metody snižování emisí NO<sub>x</sub>**

Další možností snížení emisí NO<sub>x</sub> je aplikace sekundárních metod snižování emisí. Tyto sekundární metody jsou zastoupeny zejména dvěma technologiemi a to technologií SNCR a technologií SCR. Obě technologie jsou popsány v následujících kapitolách.

#### **4.2.2 SNCR**

##### **4.2.2.1 Popis technologie**

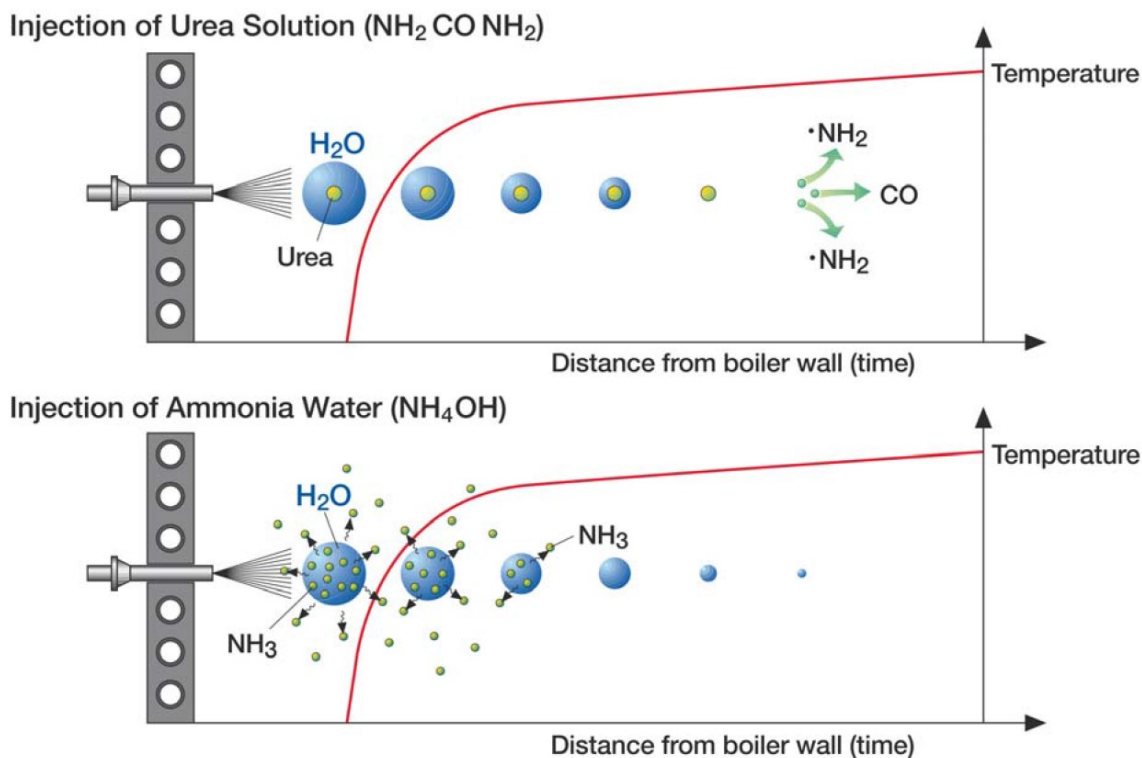
Druhou sekundární metodou je technologie SNCR. Jelikož jsem si aplikaci této metody vybral jako téma diplomové práce, je popisu a úskalí této technologie věnována širší část diplomové práce. Technologie snižování emisí NO<sub>x</sub> byla vyvinuta okolo roku 1988 v USA. Selektivní nekatalytická redukce je založena na vstřikování čpavku nebo močoviny do prostoru spalovací komory a to do vhodného teplotního okna. Na obr. 4.1 je znázorněno požadované teplotní okno pro aplikaci technologie SNCR.



**Obrázek 4.1 - Teplotní okno pro technologii SNCR [1].**

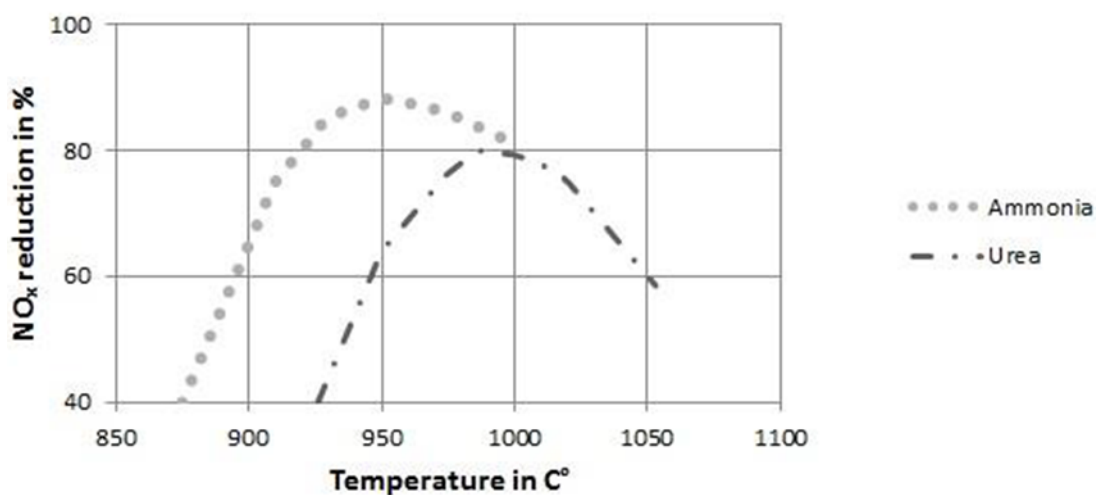
Podstatný rozdíl, který existuje mezi oběma redukčními prostředky, a to močovinou a čpavkovou vodou, je patrný na obr. 4.2. Močovina rozpuštěná ve vodě se může štěpit na radikály schopné reakce teprve tehdy, když se voda, které obklopuje částice močoviny, kompletně odpaří. Velikostí vodních kapek a z toho plynoucí hloubky proniknutí do proudu spalin může být předem určeno místo, kde mají probíhat reakce. Když je kapka vody dostatečně velká a dostatečně daleko nesena, dovoluje to například stříkat do místa příliš horkého pro odloučení NO<sub>x</sub> a umožňuje to reakci na studenějším místě spalin. Vstříkovaná voda s močovinou může případně ochladit spaliny na požadovanou teplotu. Protože je močovina velmi korozivní, musí být bez podmíněně zabráněno setkání roztoku močoviny s trubkami kotle. Naproti tomu u zařízení, u nichž se použije čpavková voda, se čpavek odpařuje do spalin bezprostředně po vstupu do kotle, a protože nemusí být nejdříve rozložen, může s NO<sub>x</sub> bezprostředně reagovat. Tyto reakce se uskutečňují blízko chladných stěn kotle, kde existuje velká pravděpodobnost, že bude vyráběn čpavkový skluz [2].





Obrázek 4.2 - Rozklad reagentů [1].

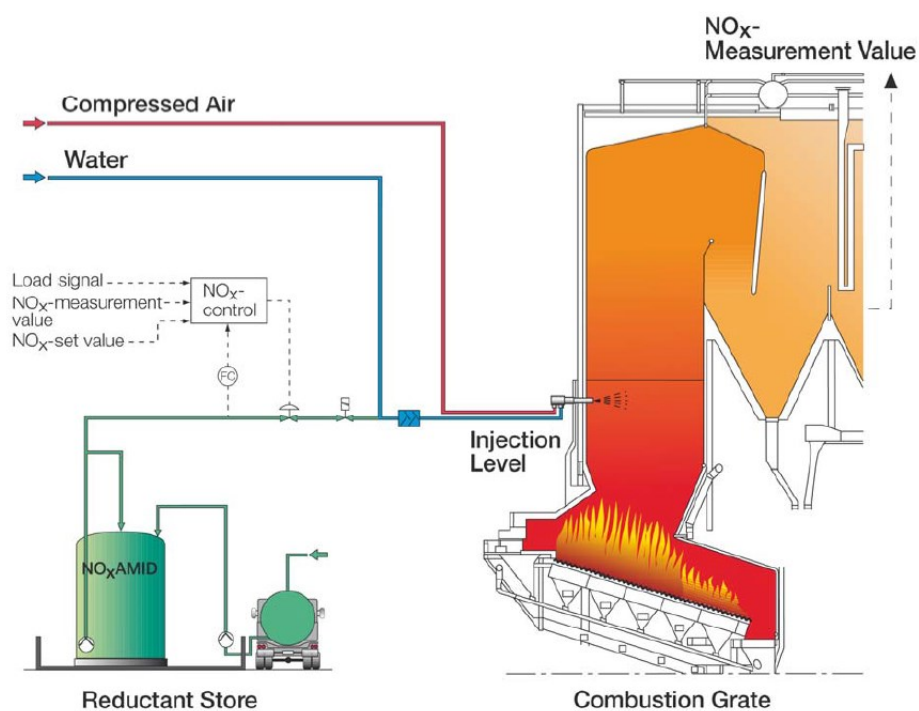
Ve firemních materiálech společnosti DUSTEX je možné se dočíst, že při aplikaci čpavkové vody je optimální teplota pro nástřik v pásmu 900 – 1000 °C, v případě použití močoviny pak 950 – 1050 °C. Posun teplotního okna je patrný z níže uvedeného obr Obrázek 4.34.3.



Obrázek 4.3 - Teplotní pole pro aplikaci čpavkové vody a močoviny [3]

Technologie SCNR, jejíž zjednodušené schéma je patrné na obr. 4.4 , se obecně skládá z:

- zásobní nádrže
- čerpadel reagentu
- mísících modulů
- rozvodů procesní vody, reagentu a tlakového vzduchu



**Obrázek 4.4 - Zjednodušené schéma aplikace SNCR [1]**

Vlastní aplikace technologie SNCR může mít různé podoby. Základní koncepční pohled je podle požadavků technologie uveden v tabulce tab 4.1.

**Tabulka 4-1 - Základní koncepce použití SNCR [2]**

Použití	Výkonový rozsah	NO <sub>x</sub> v čistém plynu [mg/Nm <sup>3</sup> ]	Skluz NH <sub>3</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> ]	Vstřikovací roviny	Ostatní
Malá spalovací zařízení	80 – 100 %	≤ 200	≤ 20	1	
Mírný stupeň odloučení NO <sub>x</sub>	90 – 100 %	≤ 200	≤ 15	1	
Střední stupeň odloučení NO <sub>x</sub>	60 – 100 %	≤ 150 - 200	≤ 15	2	
Vysoký stupeň odloučení NO <sub>x</sub>	50 – 100 %	≤ 100 – 150	≤ 15	3	
Vysoký stupeň odloučení NO <sub>x</sub> a malý čpavkový skluz		≤ 100	≤ 5 - 10	3	Akustické měření teploty

Zastavme se u některých základních konstrukčních uzlů technologie SNCR.

#### **a) Zásobní nádrže reagentu**

Principiálně jsou odlišné podle používaného reagentu. Čpavková voda (24 – 25 %) má přísnější požadavky na skladování močoviny. Používají se ležaté i stojaté zásobní nádrže různých materiálových provedení (nerez, plast, laminát). Při návrhu jejich velikosti by se mělo vycházet zejména z:

- očekávaných spotřeb a požadavků na disponibilitu zařízení
- požadavků na kontroly nádrží

- skladovacích rezerv pro případy svátků, stávek, výrobních výluk apod.
- logistiky reagentu:
  - výluky ve výrobě
  - velikost automobilových cisteren ve vztahu k zůstatkovým množstvím v nádržích
  - svátcích
  - riziku stávek atd.



*Obrázek 4.5 - Detail stáčecího místa čpavkové vody [4]*

Stáčecí místa jsou vybavována záchytnými vanami (havarijními jímkami), detekcí úniků  $\text{NH}_3$ , sprinklerovým systémem, akustickou a světelnou signalizací, bezpečnostními sprchami apod.

## **b) Mísic a rozdělovací moduly**

Jedná se o soustavu ventilů zabezpečující přípravu reagentu. Jejich provedení je skříňové nebo nástěnné.



*4.6 - - Mísící a rozdělovací modul [1]*

c) Vstřikovací kopí a trysky

Pohled na instalované vstřikovací kopí je na obr. 4.7.



*Obrázek 4.7 – Vstřikovací kopí [1]*

K montáži vstřikovacích kopí dochází buď přes výhyby v membránových stěnách nebo přes praporky. Pro aplikace trysek se používá celá škála vstřikovacích kopí a trysek. Tyto kopí jsou osazeny tryskami různých konstrukčních provedení. Při jejich návrhu se používají moderní technologie jako například laserové optické zařízení pro měření vlastností trysek (mlhy). Podobná zařízení se v energetice používají i například při návrhu trysek odsíření, vestaveb chladicích věží atd. Velmi dobrou zkušenost s těmito technologiemi mají pracoviště ČVUT a VUT Brno.



*Obrázek 4.8 - Měřicí zařízení [5]*

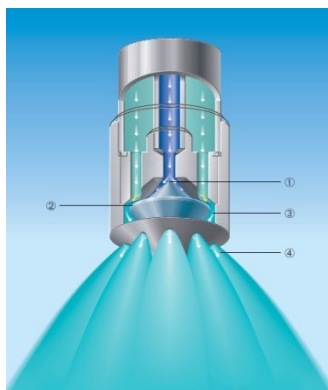
V laboratořích se u trysek ověřuje:

- průtok
- velikost a rychlost kapek
- tvar paprsku
- atd.

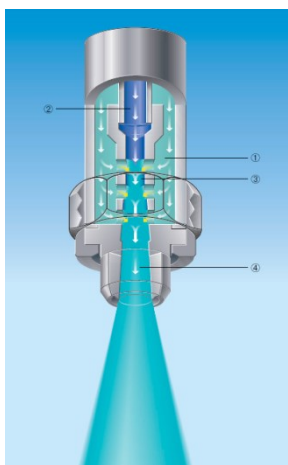
V materiálech společnosti LECHLER nalezeneme tyto možné druhy trysek:

- VarioJet nozzles
- Spillback nozzles
- Laval nozzles
- Twin-fluid nozzles

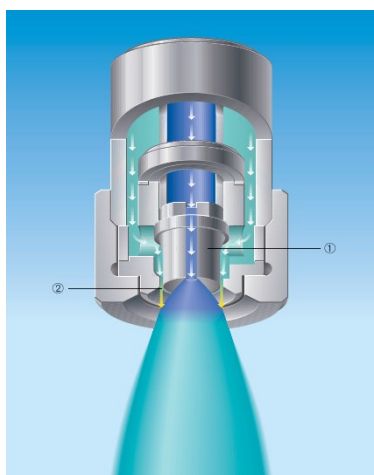
Vybrané rozdíly mezi tryskami jsou na obrázcích na následující stránce.



**Obrázek 4.10 - Schéma VarioJET trysky s atomizací vzduchem (tlak vzduchu 1 – 6 bar, tlak kapaliny 9 bar, úhel 60°)**



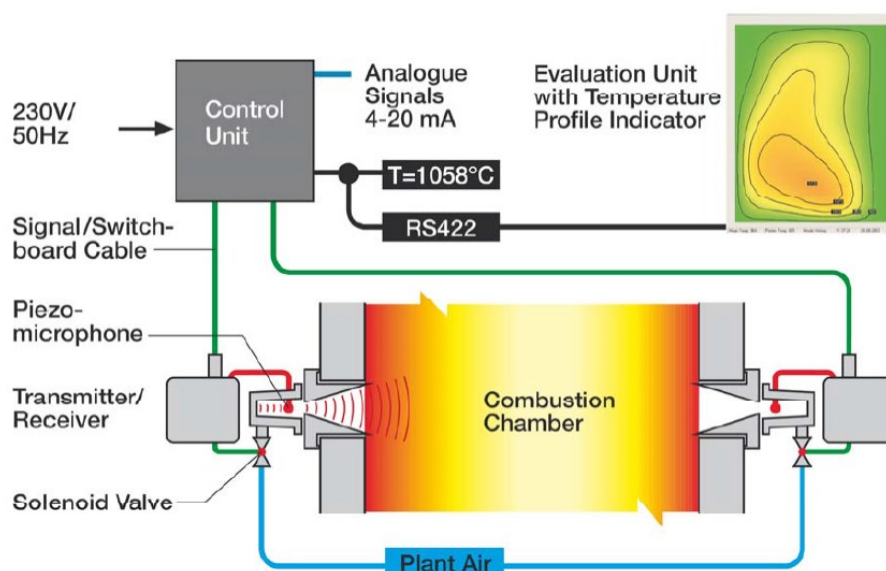
**Obrázek 4.9 - Schéma Lavalovy trysky (tlak vzduchu 5 bar, tlak kapaliny 5 bar, úhel 15°)**



**Obrázek 4.11 - Twin - fluid tryska (tlak vzduchu 5 bar, tlak kapaliny 10 bar, úhel 20 – 30°)**

#### d) AGAM

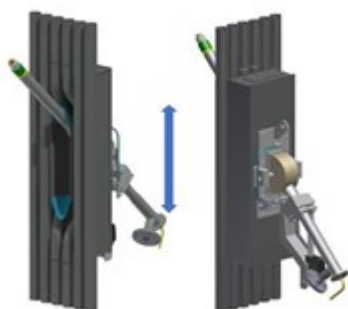
Snaha o optimalizaci technologie SNCR vedená vstřikováním reagentu do optimálního teplotního pole, provozu technologie s minimálními náklady na reagenty a minimálním čpavkovým skluzem vedla k doplněním technologie SNCR o akustické měření teploty podle kterého se upravuje provoz jednotlivých vstřikovacích rovin a trysek.



*Obrázek 4.12 - Princip měření teploty spalín ve spalovací komoře pomocí akustického měření teploty AGAM [1]*

#### 4.2.2.2 Nové konstrukční směry technologií SNCR

V současné době se celá řada dodavatelských firem snaží v maximální míře unifikovat své nabízené technologie SNCR tak, aby si zajistili konkurenční výhodu a to ve dvou směrech. Jednak k technologii SCR a jednak mezi jednotlivými technologiemi. Pro velké kotelní jednotky se používají automatické naklápěcí kopí. Tato technologie se označuje v literatuře jako ANCR (Adaptive None Catalytic Reduction) a je znázorněna na obr. 4.13.



*Obrázek 4.13 - Adaptive None Catalytic Reduction*



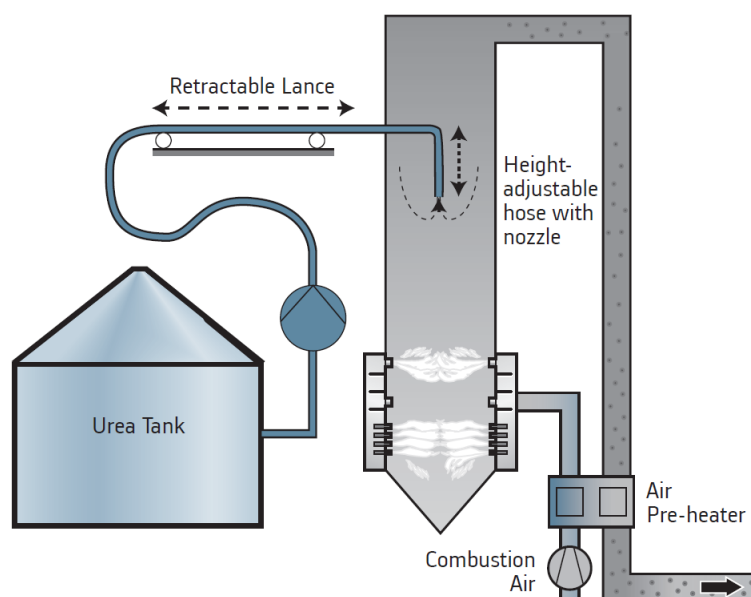
U aplikací SNCR je největší problémem:

- posun teplotního pole uvnitř spalovací komory při různých provozních režimech kotle (výkon kotle, provoz jednotlivých pásem hořáků a mlýnů)
- vykrytí co největšího průřezu spalovací komory u větších rozměrů ohnišť

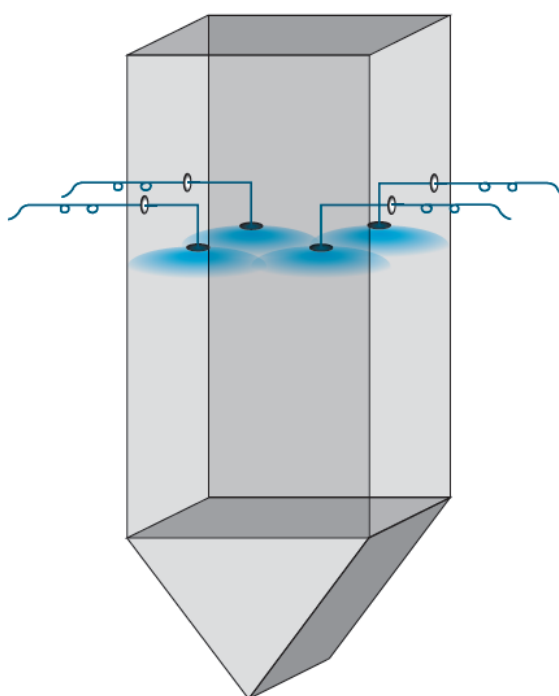
Pro řešení těchto problémů vyvinula společnost Alstom technologii USNCR. Jádrem technologie je chlazená tryska, která se zasouvá do středu spalovací komory a dále je vertikálně spouštěna podle posunu teplotního pole. Tím je zajištěno:

- maximální vykrytí průřezu spalovací komory
- vstřikování do pásma optimálních teplot
- minimalizace nákladů na jednotlivé úrovně vstřikování reagentu

Princip metody je patrný z obr. 4.14 a 4.15.



**Obrázek 4.14 - Schéma technologie USNCR společnosti [6]**



**Hose with Nozzle**

**Obrázek 4.15 - Možnost aplikace technologie USNCR pro rozměrnější ohniště [6]**

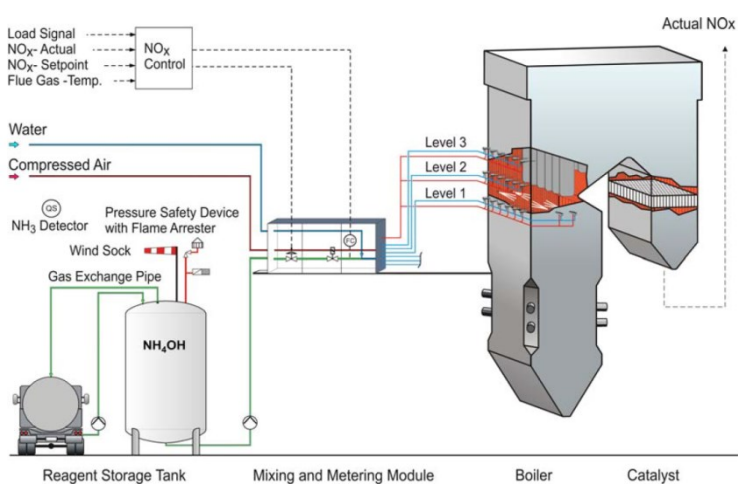
Na obr. 4.16 je znázorněn detail kopí technologie USNCR.



**Obrázek 4.16 - Detail výsuvného chlazeného kopí technologie USNCR [6]**

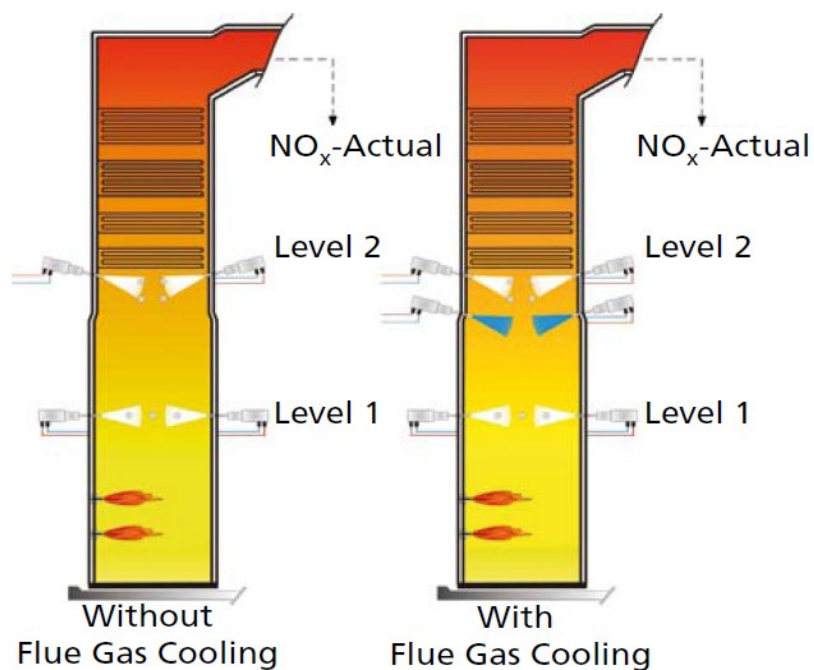
Existuje samozřejmě celá řada dalších řešení konstrukčního řešení technologie SCNR (ROTAMIX společnosti Nalco Mobotec).

Snaha minimalizovat čpavkový skluz vedl k doplnění technologie SNCR o malý SCR katalyzátor (slipp killer), který se instaluje do zadních tahů. V ČR na fluidních kotlích je aplikován na dvou fluidních kotlích ve společnosti Alpiq ECK Kladno. Schéma aplikace je na následujícím obrázku obr. 4.17.



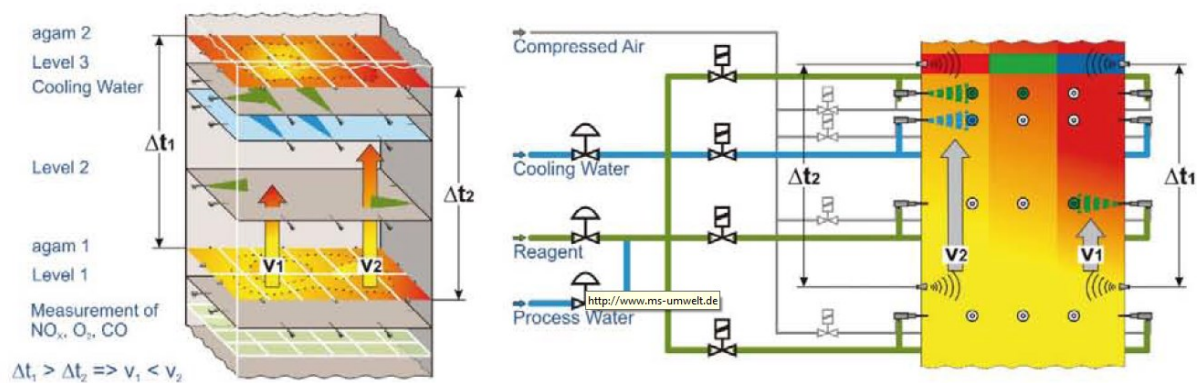
**Obrázek 4.17 - Konstrukční řešení slipp killeru [1]**

Další možnou technologií jak zlepšit a optimalizovat provoz technologie SNCR je řízené ochlazování spalin nástřikem chladicí vody. Schéma je na obrázku obr. 4.18.



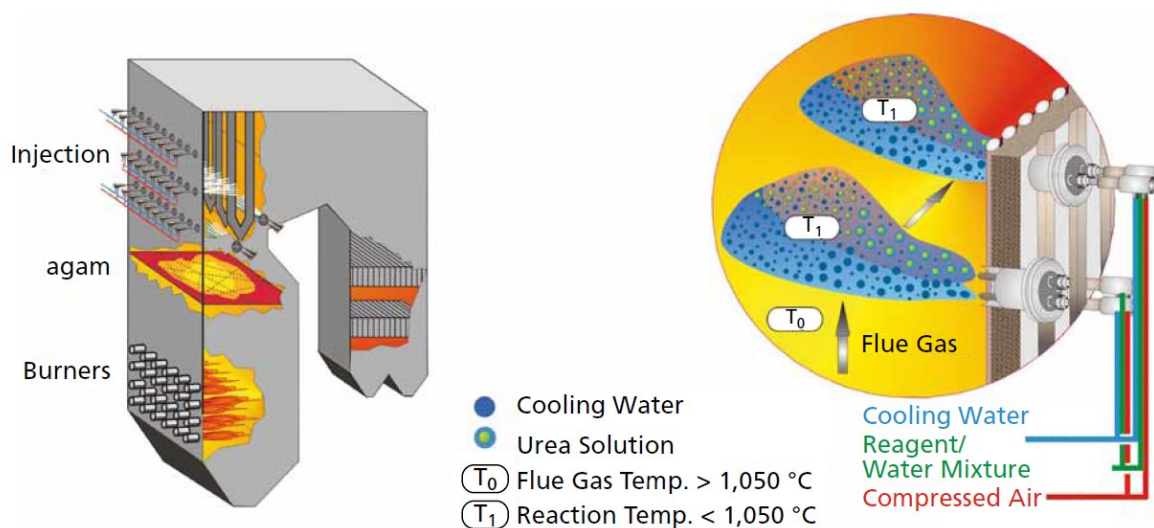
Obrázek 4.18 - SNCR s nástřikem chladicí vody [1]

Princip řízení je pak patrný z obrázku obr. 4.19.



Obrázek 4.19 - Způsob řízení SNCR s nástřikem chladicí vody [1]

Chlazení probíhá roztřednictvím jednoplivých trysek v závislosti na změřením teplotním profilu tak, jak je patrné z obr. 4.20.

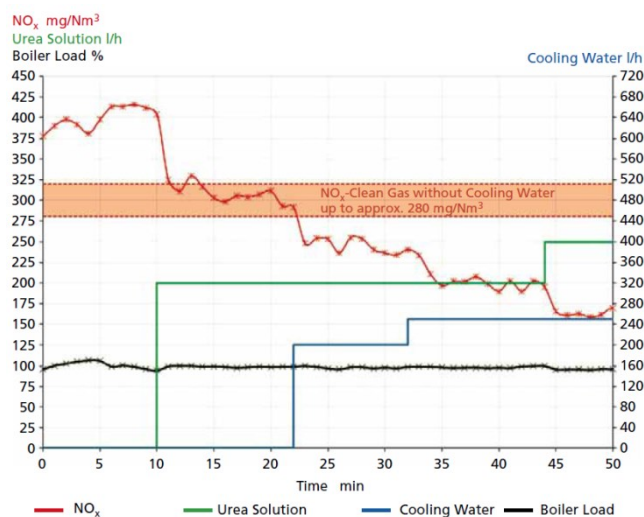


Obrázek 4.20 - Způsob řízení SNCR s nástřikem chladicí vody [1]

Specialista společnosti MEHLDAU & STEINFATH ve svém článku týkajícím se účinků dopadů chlazení spalín uvádí, že pro kotel o výkonu 85 t/h byly dosaženy tyto výsledky:

- emise  $\text{NO}_x$  před aplikací SNCR –  $400 \text{ mg/Nm}^3$
- emise po aplikaci SNCR –  $250 \text{ mg/Nm}^3$
- emise po aplikaci SNCR a provozování přídavného chlazení –  $160 \text{ mg/Nm}^3$  [7]

Provozní data jsou patrná z obr. 4.21.

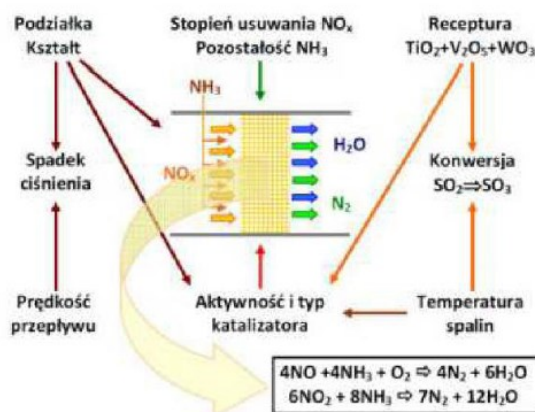


Obrázek 4.21 - Průběh emisí  $\text{NO}_x$  po retrofitu technologie SNCR

## 4.2.3 SCR

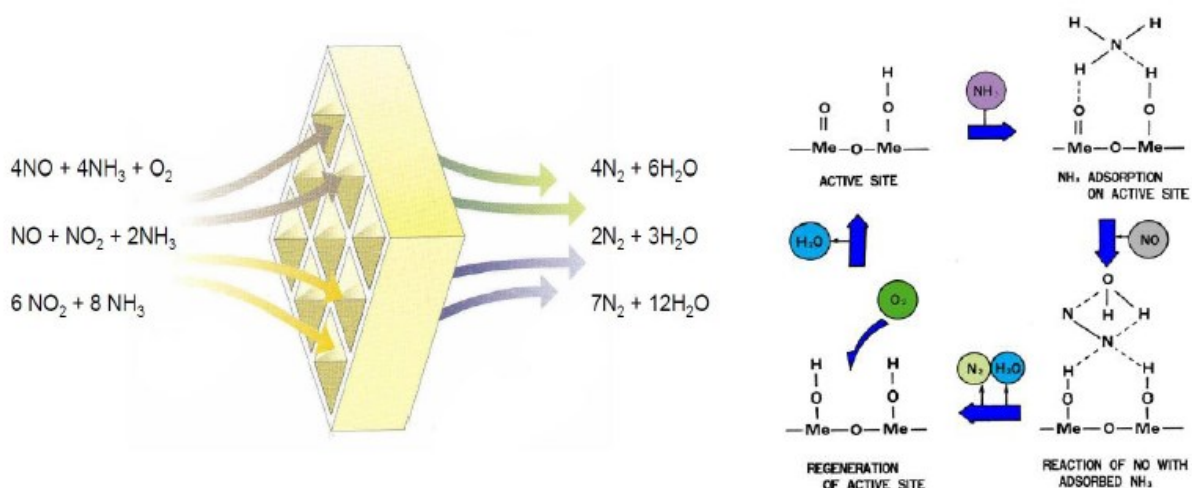
Technologie Selektivní katalytické redukce je založena na vstřikování redukčního činidla do spalin před katalyzátorem. Během průchodu spalin katalyzátorem dochází k míšení těchto dvou směsí a za přítomnosti katalyzátoru k chemické reakci, kde jsou oxidy dusíku obsažené v těchto spalínách opětovně měněny zpět na dusík (N) a vodní páru (H<sub>2</sub>O).

Průběh chemických reakcí je znázorněn na níže uvedeném obrázku.



Obrázek 4.22 - Průběh chemických reakcí při SCR

Děje na katalyzátoru jsou znázorněny na obr. 4.23.



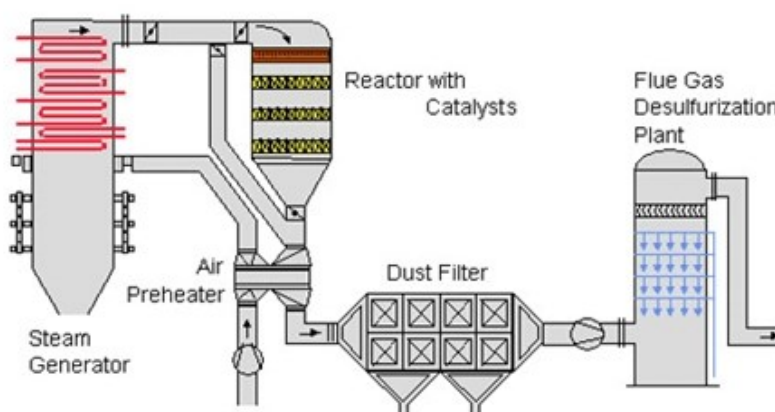
Obrázek 4.23 - Průběh chemických dějů na katalyzátoru

Teplotní okno této reakce se uvádí 100 – 600 °C.

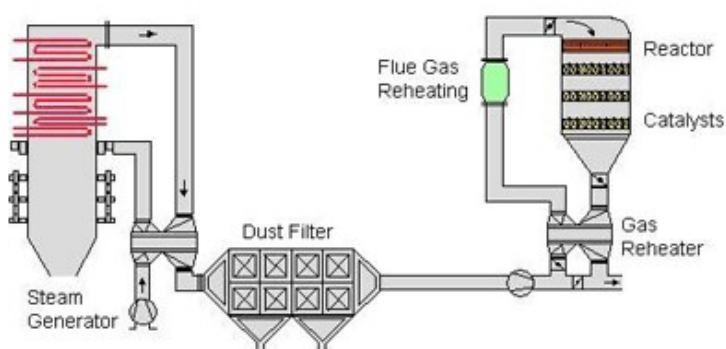
Mezi nejpoužívanější materiály katalyzátoru pro technologii SCR patří:

- oxidy těžkých kovů – nejčastějším případem je oxid vanadičný ( $V_2O_5$ ) s přídavkem oxidu wolframového ( $WO_3$ ) u této kombinace se uvádí teplotní okno 300 – 450 °C
- zeolity – mají širší teplotní okno, které se uvádí 350 – 600 °C
- oxidy železa
- aktivní uhlí – zde je teplotní okno nejnižší, uvádí se 100 – 220 °C

U technologie SCR existují tři základní typy uspořádání, které jsou znázorněny na obrázcích 4.24 až 4.26.

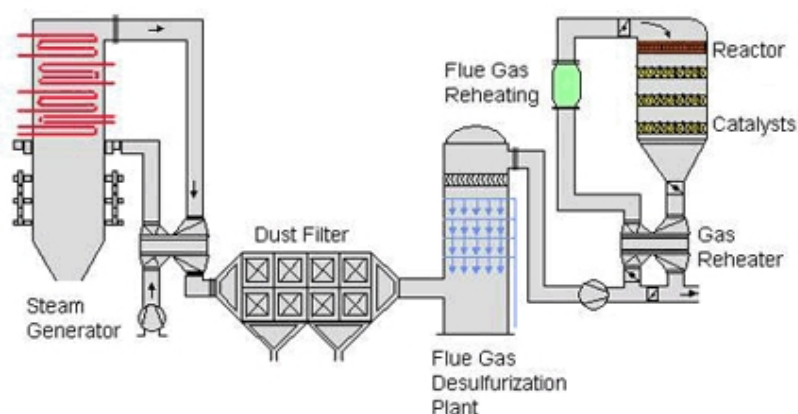


**Obrázek 4.24 - Vysokoprašný systém (HIGH DUST)**



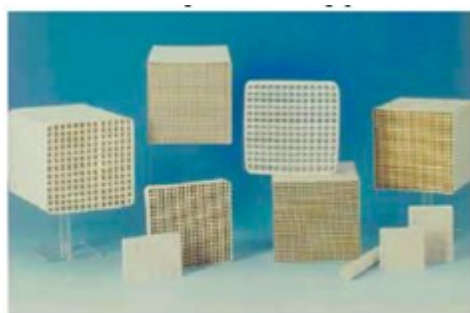
**Obrázek 4.25 - Nízkoprašný systém – uspořádání za prachovým filtrem**





**Obrázek 4.26 - Uspořádání za odsířením – TAIL END**

V technické praxi se používají dva typy konstrukčních provedení katalyzátorů a to plástvový a deskový. Jejich provedení je patrné z obr. 4.27.



a)plástvový



b)deskový



c) deskový uspořádaný do košů

**Obrázek 4.27 - Konstrukční provedení katalyzátorů**

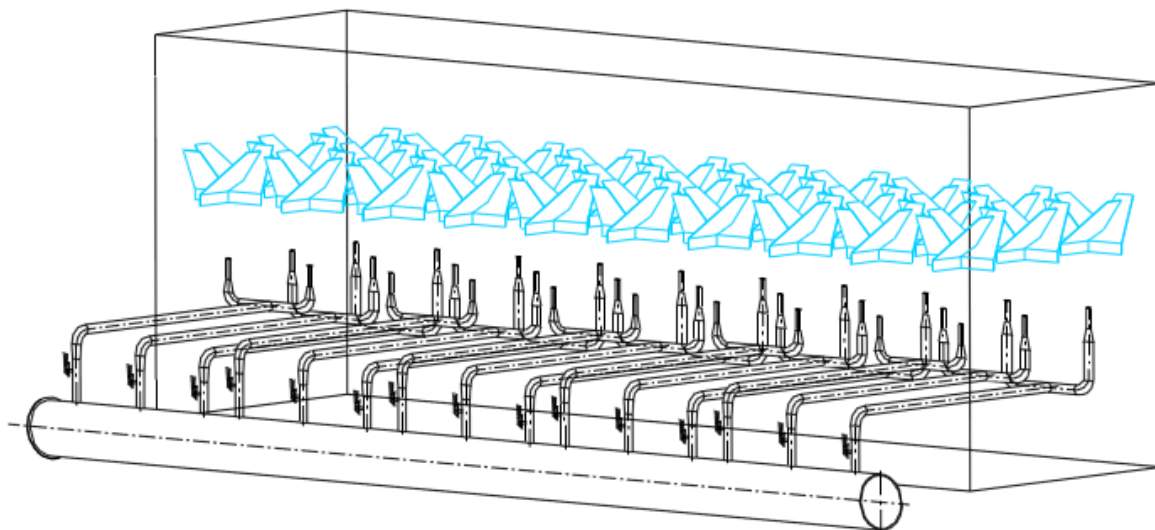
U předchozích aplikací SCR se plástvový katalyzátor (honeycomb) používal zejména u kotlů spalujících černé uhlí. Současný vývoj jde spíše směrem deskovým katalyzátorům. Jednotlivé části desek jsou osazovány do modulů a ty pak do jednotlivých košů viz obr. 4.27.

Technologie SCR má celou řadu prvků shodných s technologií SNCR. Technologie SCR je tvořena:

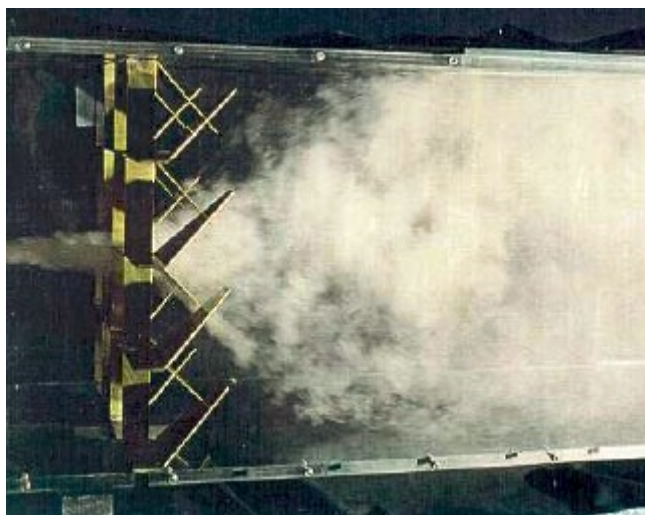
- technologii skladování čpavkové vody
- dávkovacími moduly čpavkové vody
- odpařovacím modulem čpavkové vody
- AIG mříží, která společně s vestavbami umožňuje správnou distribuci reagentu napříč kanál spalin



- katalyzátorem SCR
- soustavou parních a akustických ofukovačů



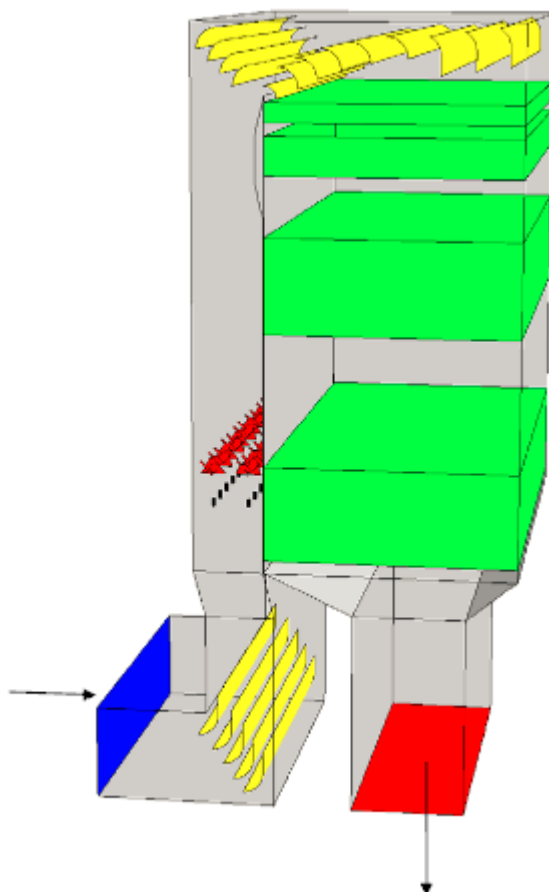
*Obrázek 4.28 - AIG mříž a mixér [8]*



*Obrázek 4.29 - Detail funkce mixéru [8]*

Velmi důležitým aspektem při návrhu technologie SCR je aerodynamika a distribuce reagentu do prostoru kanálu spalin. Pokud nejsou kanály spalin správně navrženy, dochází k:

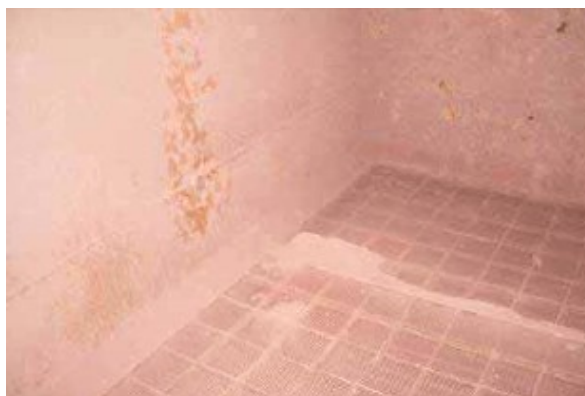
- zanášení
- nerovnoměrnému toku spalin po průřezu kanálu
- neoptimálnímu zatížení katalyzátoru
- ucpávání košů s katalyzátory
- poškozování abrazí a k zanášení katalyzátoru



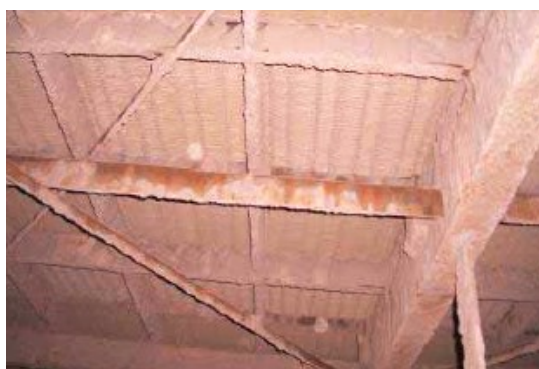
***Obrázek 4.30 - Kanálové vestavby pro zrovnoměrnění průtoku spalin [8]***



***Obrázek 4.31 – Pohled na horní část katalytické vrstvy – detail jednotlivých modulů***

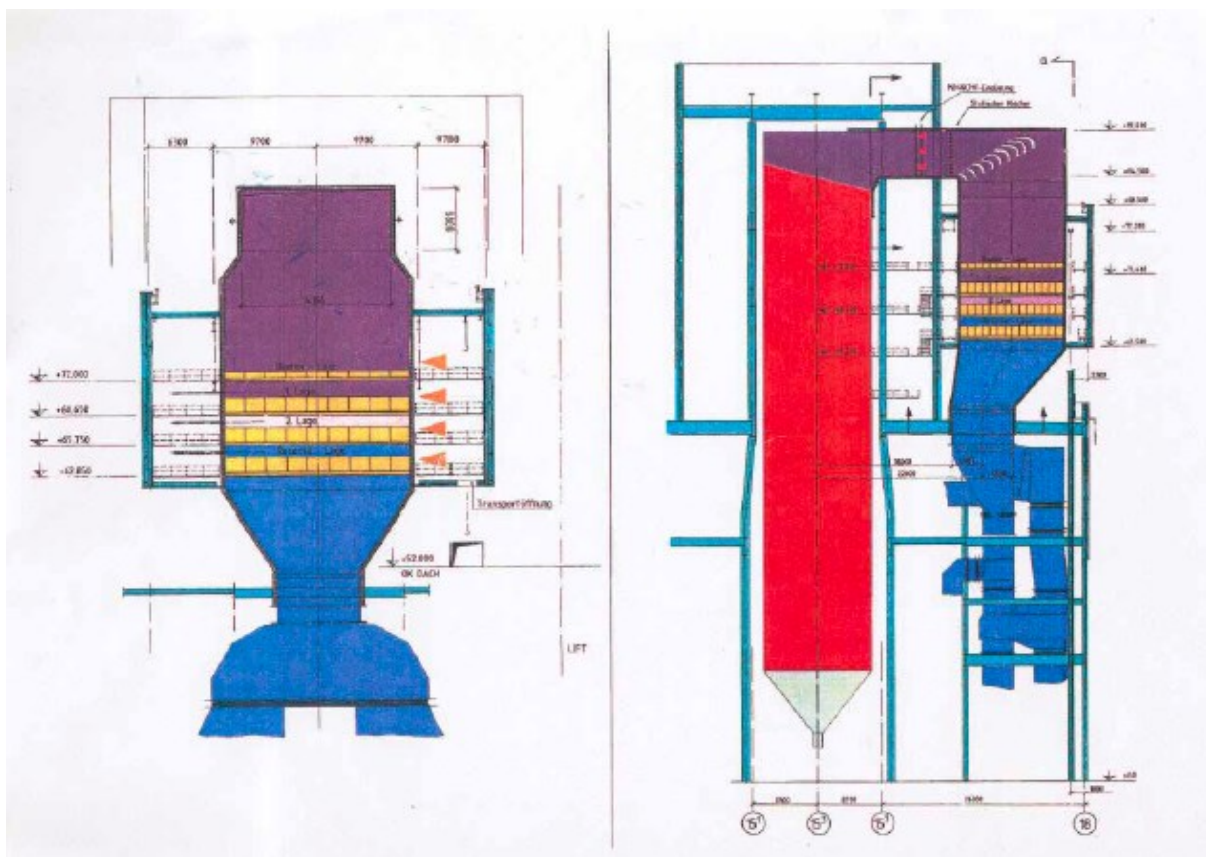


***Obrázek 4.32 - Detail kanálu spalín s umístěným katalyzátorem***



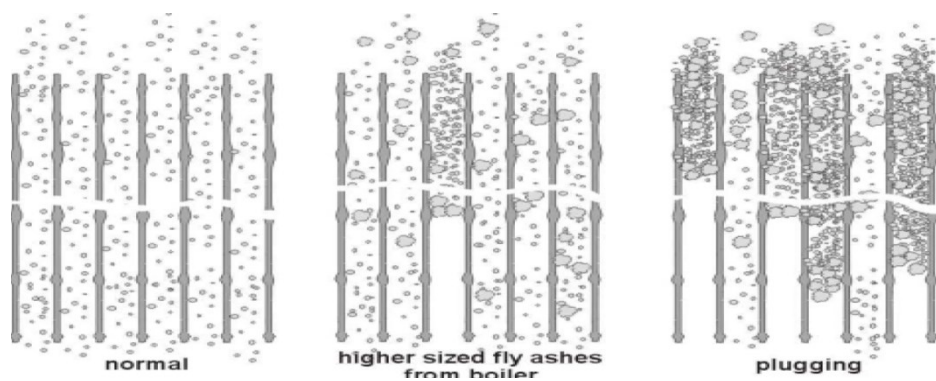
***Obrázek 4.33 - Detail výstupní části katalyzátoru***

Existuje celá řada konstrukčních řešení (provedení) katalyzátorů SCR v kanálech spalin.

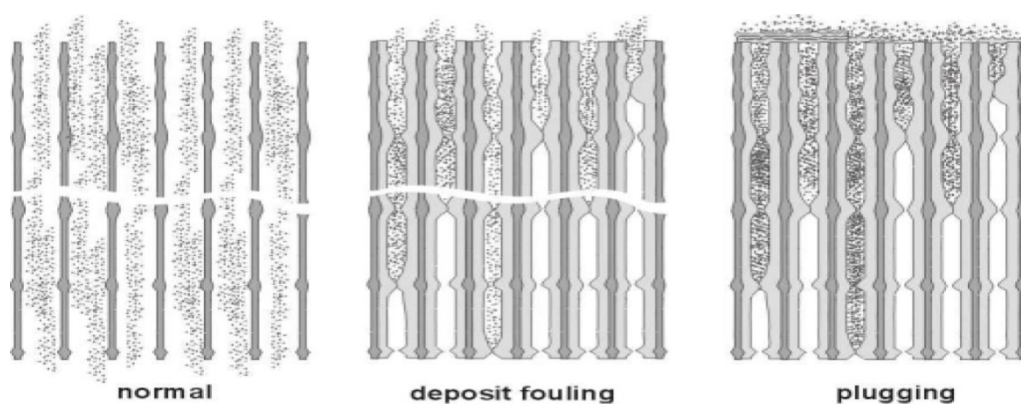


**Obrázek 4.34 - Detail konstrukčního řešení katalyzátorů**

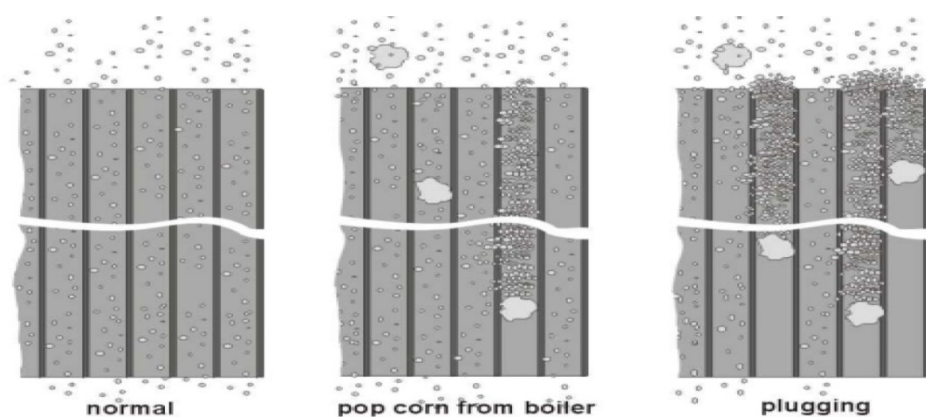
Za provozu SCR technologie dochází k celé řadě provozních stavů vztahujícím se k provozování katalyzátorů. Některé problémy vztahující se k provozování katalyzátorů jsou na obrázcích 4.35 až 4.37.



**Obrázek 4.35 - Normální provoz katalyzátoru a mechanismus vzniku ucpání katalyzátoru**

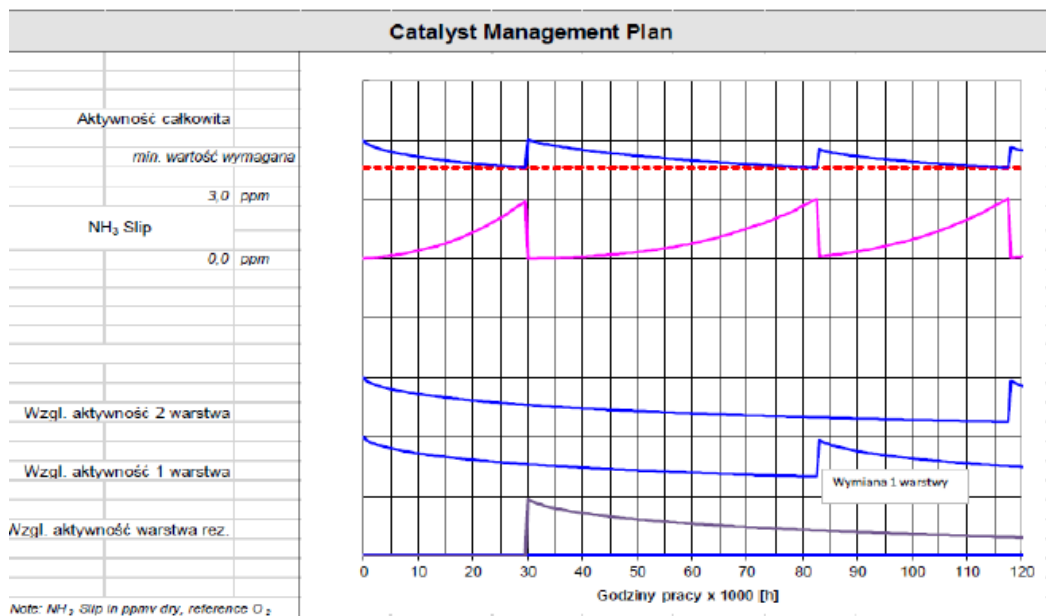


**Obrázek 4.36 - Uzavírání katalyzátoru (např. od nánosů MgO)**



**Obrázek 4.37 - Uzavírání katalyzátorů od aglomerovaných popílků – popcorn efekt**

Nerovnoměrnost průtoku spalin, špatná distribuce reagentu, rozdílné zatížení katalyzátoru popílkem, obsah popílku ve spalinách, chemické působení residuí spalování a popílků na plochu katalyzátoru apod. mají vliv na životnost katalyzátoru. Klasický diagram provozu katalyzátoru je na následujícím obrázku.



**Obrázek 4.38 - Management katalysátorů [9]**

## 5. Návrh technologie snižování emisí NO<sub>x</sub> fluidního kotle K5

V praktické části diplomové práce se zabývám návrhem technologie SNCR fluidního kotle K5. Fluidní kotel K5 má parametry uvedené v tab. 5.1.

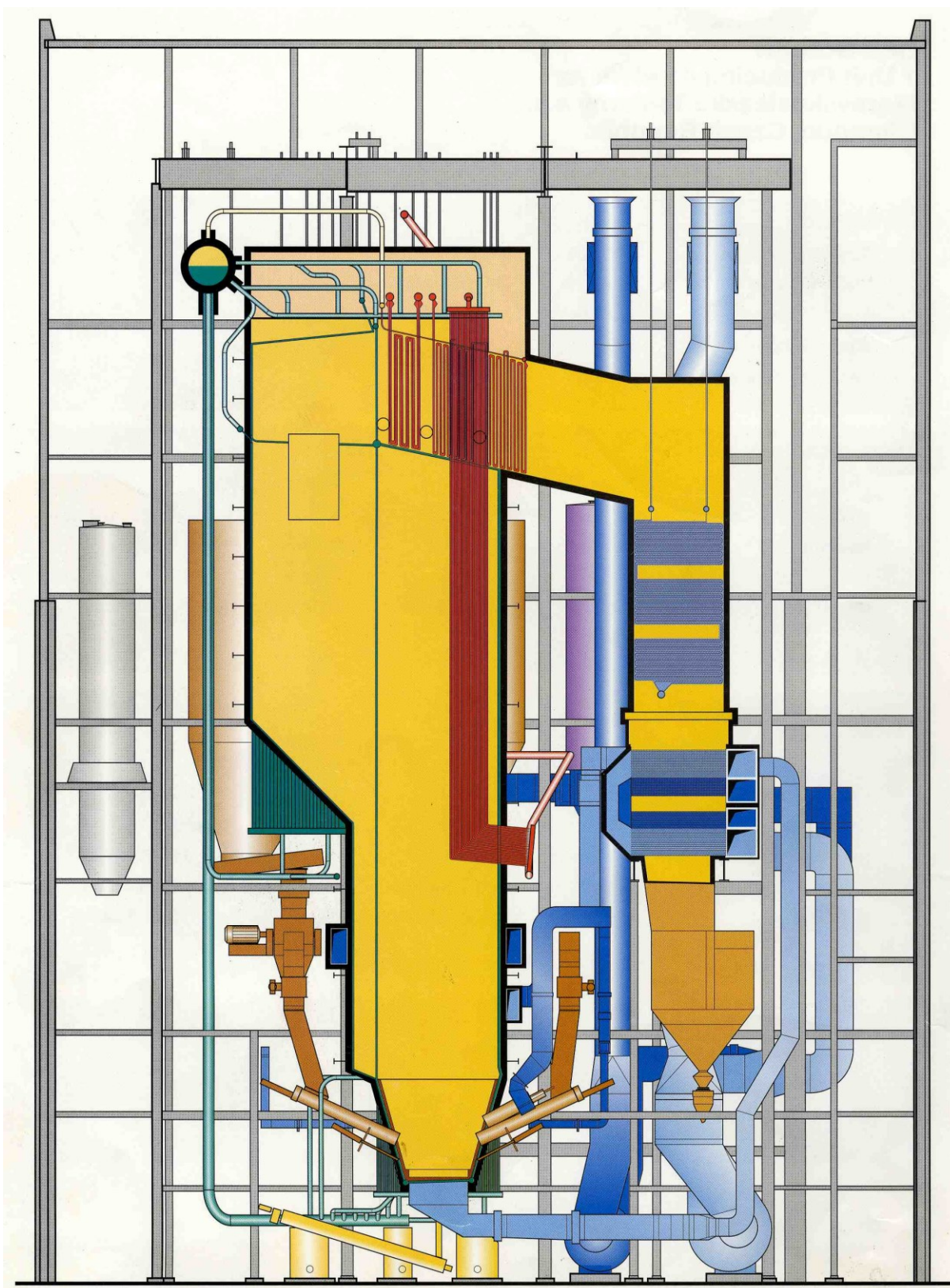
*Tabulka 5-1 - Technické parametry fluidního kotle K5 [10]*

Typ kotle	CFB Compact
Výrobce	Foster Wheeler
Jmenovitý výkon kotle	141,3 MW (188,5 t/h)
Provozní tlak páry	13,5 MPa
Výstupní teplota páry	535 °C
Teplota napájecí vody	170 (162 při provozu 1 VTO) °C

Jedná se o fluidní kotel Pyroflow Compact společnosti Foster Wheeler, který byl v Olomouci uveden do provozu v roce 1998. Schéma kotle je na obr. 5.1. Kotel byl navržen jak na spalování hnědého uhlí, tak i na spalování černého uhlí. Od svého uvedení do provozu až po realizaci garančních měření na obě paliva byl provozován pouze na hnědé uhlí. Kotel je osazen dvěma uhelnými linkami. Každá linka je navržena na 100 % výkonu kotle. Palivo je do spalovací komory dopravováno pomocí čtyř podávacích šneků paliva. Hranatý cyklon je integrovanou součástí výparníku. Regulace teploty lože se provádí pomocí recirkulace spalin do spalovací komory. Uvnitř spalovací komory se nachází deskový přehřívák páry PII (5 křídel). Dávkování vápence je realizováno čtyřmi vstupy do prostoru nad fluidní vrstvou. Kotel je dále vybaven trubkovým ohřívákem vzduchu. Zapalování kotle je realizováno pomocí tří najížděcích a pěti ložových hořáků.

Kotel je provozován v základním zatížení celoročně, jeho údržba je řízena s ohledem na vysokou disponibilitu podle zásad RCM.

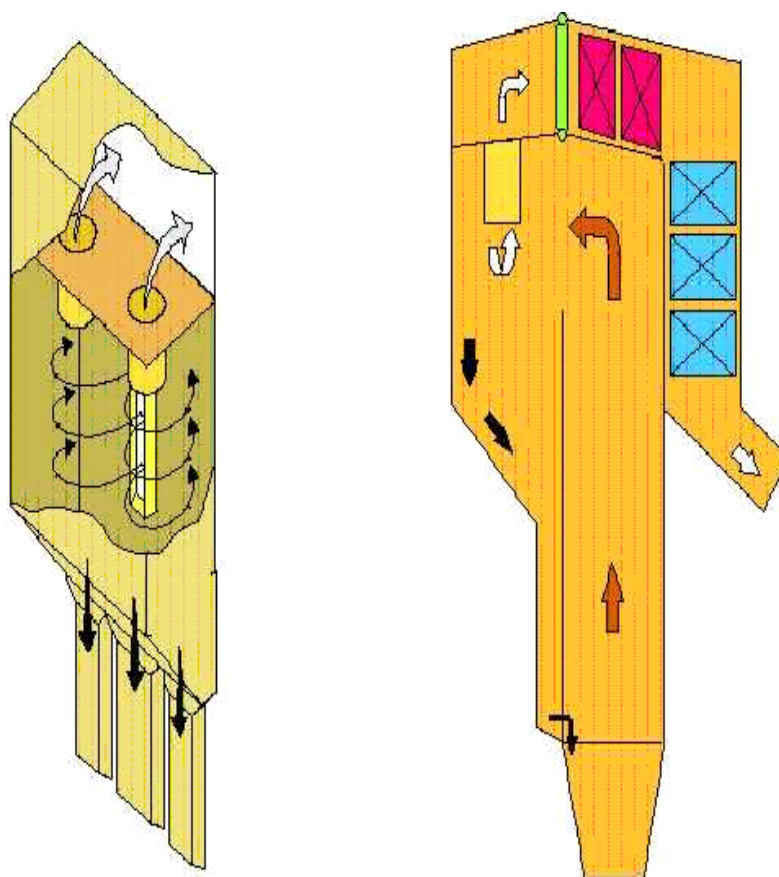




*Obrázek 5.1 - Řez fluidním kotlem*



Princip cirkulace fluidního kotle K5 je na obr. 5.2.



*Obrázek 5.2 - Princip fluidního kotle K5 – schéma cirkulace*

Z měření realizovaných ve 12/2015 výrobcem kotle, u kterých jsem byl fyzicky přítomen, vyplynulo:

- další snížení emisí  $\text{NO}_x$  primárními metodami by si vyžádalo značné zásahy do kotle a příspěvek ke snížení bazického bodu pro aplikaci sekundárních metod by byl již. Tyto zásahy by spočívaly zejména:
  - ve výměně dna
  - v úpravách kanálů primárního vzduchu
- recirkulace spalín je již aplikována a funkční
- aplikace SCR pro legislativně požadovanou hodnotu emisí  $\text{NO}_x$  je zbytečná

S ohledem na výše uvedené volím pro kotel K5 aplikaci SNCR metody na bázi čpavkové vody.

Jelikož se v dlouhodobém horizontu neuvažuje se změnou palivové základny, v diplomové práci uvádím pouze informace vztahující se ke spalování hnědého uhlí. V tab. tab 5.2 je uveden rozsah spalovaného hnědého uhlí.

**Tabulka 5-2 - Minimální a maximální rozsah uvažovaného paliva (HÚ) [11]**

		min.	max.
Výhřevnost $Q_i^r$	MJ.kg <sup>-1</sup>	14,0	17,0
Voda $W_t^r$	%	27,8	30,0
Popel $A^d$	%	10,5	28,5
Síra $S^d$	%	0,7	2,0

## 5.1 Obecný postup návrhu technologie SNCR

V rámci návrhu technologie SCNR pro fluidní kotel jsem vycházel z obecné metodiky návrhu a ověření umístění trysek SNCR, kterou prezentovali pracovníci společnosti Orgrez na konferenci uživatelů softwarového produktu Ansys, který se používá pro modelování spalování na kotlích a pro modelování technologie SNCR.

V rámci tohoto obecného návrhu postupuje společnost Orgrez, která je dodavatelem aplikací SNCR následovně:

- zajištění maximálního množství informací o provozování a chování kotle
- procesní výpočty objemů spalin
- vstupní měření teplotního pole pomocí prosávacího pyrometru
- prvotní návrh trysek SNCR
- nástřikové testy
- model CFD - upřesnění vstřikovacích uzlů, teplotního okna a spotřeby reagentu
- finální návrh projektu [12]

## 5.2 Provozní měření kotle

V období od 30.11.2015 do 5.12.2015 jsem se se svolením provozovatele fluidního kotle účastnil externího měření a seřizování fluidního kotle. Měření mělo zejména tyto cíle:

- v celém výkonovém pásmu kotle ověřit schopnost odsíření pouze ve fluidní vrstvě a to na nové emisní limity
- sběr dat pro CFD modelování
- stanovit výchozí referenční hodnoty emisí  $\text{NO}_x$  před aplikací technologie SNCR
- určit průběh teplot a dalších fyzikálních parametrů v jednotlivých částech kotle

Vlastní zkoušky proběhly následovně:

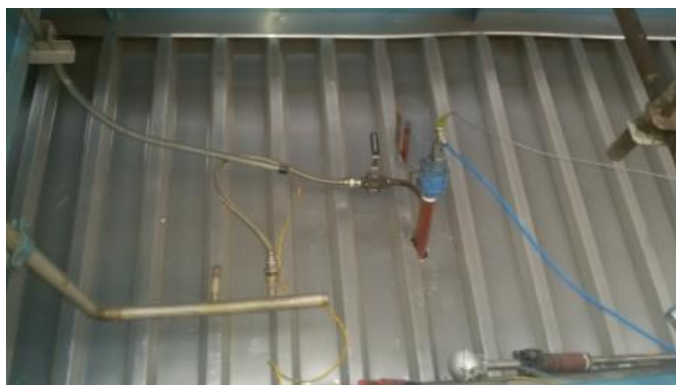
- první den 30.11.2015 – příprava měřicí aparatury
- druhý den 1.12.2015 – měření a zkoušky na minimálním výkonu 75 t/h
- třetí den 2.12.2015 – měření a zkoušky na středním výkonu 130 t/h
- čtvrtý den 3.12.2015 – měření a zkoušky na maximálním výkonu 188,5 t/h s vyšším emisním limitem  $\text{SO}_2$
- pátý den 4.12.2015 – měření a zkoušky na maximálním výkonu 188,5 t/h
- šestý den 5.12.2015 – dynamické změny výkonu

Vlastnímu měření předcházela v 06/2015 instalace odběrových míst potřebných pro proměření fluidní vrstvy a systému spalování fluidního kotle K5.



**Obrázek 5.3- Detail z měření teplot a emisí  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  po délce kanálu spalín před vstupem do ekonomisérů**

V rámci měření byly odebírány vzorky paliva na vstupu do spalovací komory, vzorky vápence a vzorky popílků. V laboratořích VŠB jsem dále pro potřeby vyhodnocení měření a pro návrh dalších technologií realizoval rozbor granulometrie popelovin a dále jsem měl možnost se účastnit laboratorních rozborů výhřevnosti, obsahu popela, volného CaO, obsahu síry atd.



*Obrázek 5.4 - Detail změření tlaku po výšce spalovací komory*

V rámci provozních zkoušek a měření byly naměřeny hodnoty uvedené v tabulce tab 5.3.

**Tabulka 5-3 - Výstupy z měření kotle [13]**

Výkon kotle	Koncentrace SO <sub>2</sub> měřená KME při zvýšeném dávkování vápence [mg/Rm <sup>3</sup> ]	Vypočtená účinnost kotle [% ]	Výchozí hodnota NO <sub>x</sub> pro aplikaci SNCR [mg/Rm <sup>3</sup> ]
40 % MCR	195	91,61	240
70 % MCR	200	92,81	272
100 % MCR	180	93,04	317

Vlastní provozní zkoušky prokázaly, že fluidní kotel K5 je bez větších úprav schopný dosahovat budoucího přísnějšího emisního limitu SO<sub>2</sub> na úrovni pod 200 mg/Nm<sup>3</sup>. Z naměřených hodnot vyplývá, že při:

- 40 % výkonu kotle bude nutné zajistit 17 % redukci emisí NO<sub>x</sub>
- 70 % výkonu kotle bude nutné zajistit 27 % redukci emisí NO<sub>x</sub>
- 100 % výkonu kotle bude nutné zajistit 37 % redukci emisí NO<sub>x</sub>

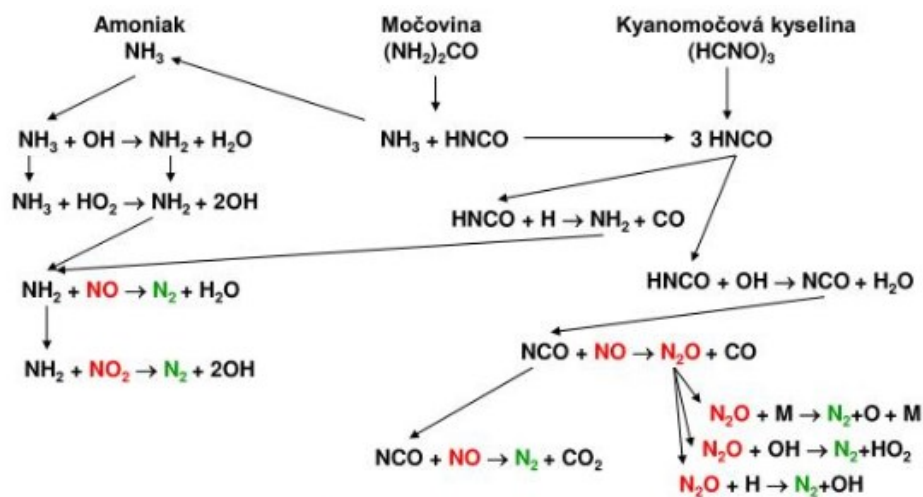
Jelikož aplikace SNCR má účinnost minimálně 40 %, je možné konstatovat, že při současném odsíření ve fluidní vrstvě by bylo možné zajistit dodatečnou denitrifikace spalin prostřednictvím technologie SNCR. Z pohledu legislativy je nutné si říci okrajové podmínky, kdy je opovažován emisní limit za splněný. Jedná se o tyto podmínky:

- žádná platná měsíční průměrná hodnota nepřekročí hodnotu specifického emisního limitu,
- žádná platná denní průměrná hodnota nepřekročí 110 % hodnoty specifického emisního limitu a
- žádná platná půlhodinová průměrná hodnota nepřekročí 200 % hodnoty specifického emisního limitu.

Plnění těchto podmínek je někdy problematické u práškových granulačních kotlů, zejména pak při dynamických změnách, kdy dochází k rozkmitání regulace tlaku a teploty páry a dále při přejíždění mlýnských okruhů.

### 5.3 Volba reagentu pro fluidní kotel K5

Jako reagentu pro fluidní kotel K5 jsem zvolil čpavkovou vodu. Reakce čpavkové vody probíhá podle rovnic uvedených na obr. 5.5.

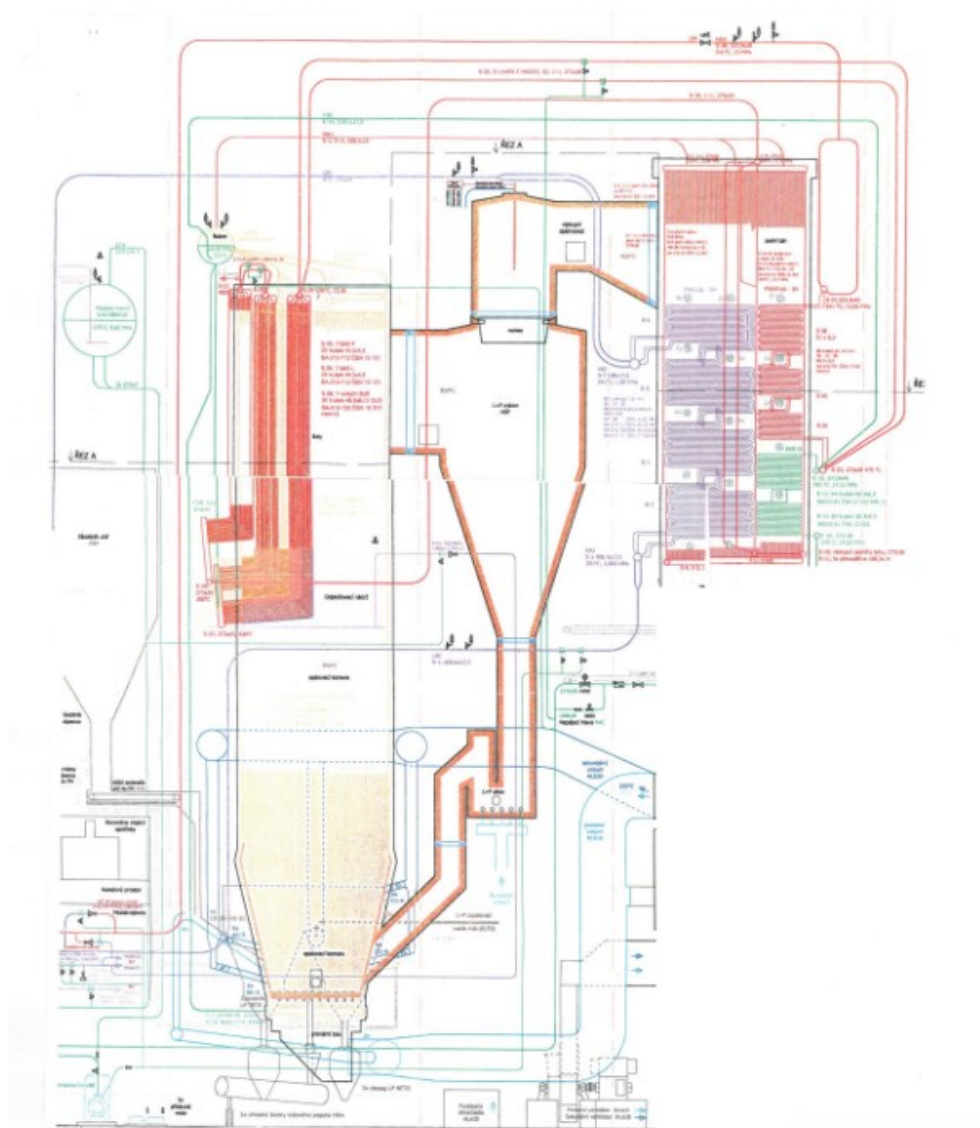


Obrázek 5.5 - Reakční rovnice čpavkové vody, vpravo pak identické rovnice pro močovinu [12]

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, močovina je značně korozivní a v podmínkách fluidních kotlů jakákoliv netěsnost tlakového celku má fatální dopady spočívající v zabetonování spalovací komory nebo separátoru, případně zadního tahu.

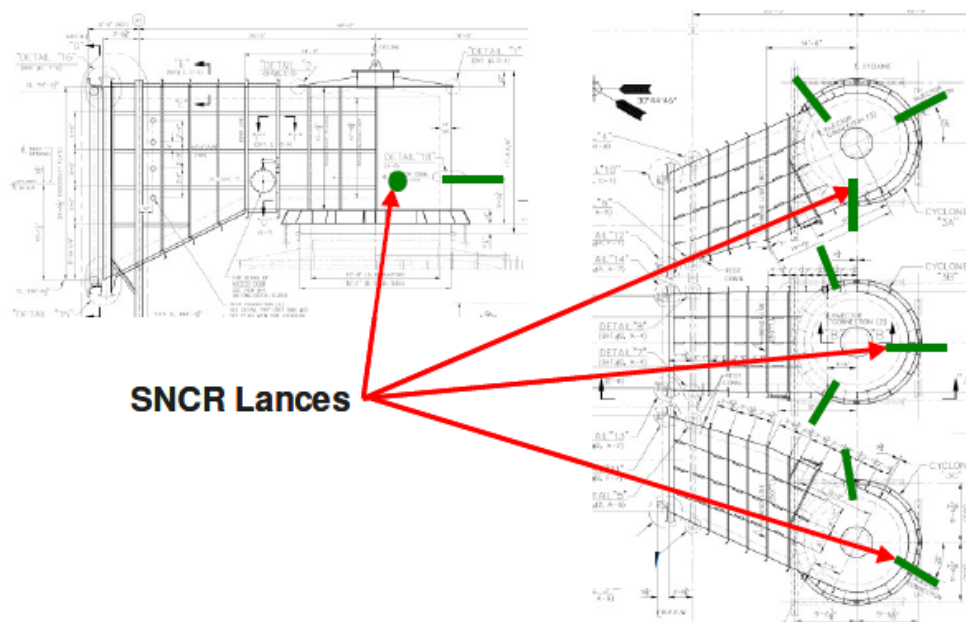
## 5.4 Určení vstřikovacích míst

Konstrukční řešení vstřikovacích míst. U fluidních kotlů s cyklonovým separátorem se trysky nebo rozstřiková mříž umísťuje do prostoru do cyklonu (obr. 5.6 a 5.7 nebo před cyklon obr. 5.8).

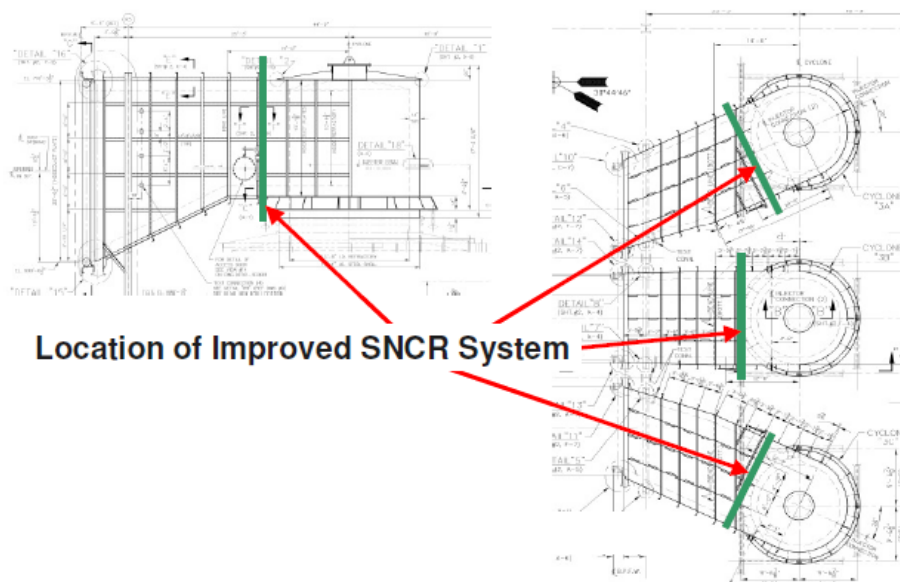


*Obrázek 5.6 - Schéma fluidního kotle společnosti Alstom s instalovaným kopím do prostoru cyklonu [14]*

Jiné uspořádání kopí je patrné z aplikace společnosti Alstom na elektrárně společnosti East Kentucky Power Cooperative's. Jedná se o uspořádání před a po retrofitu [15].



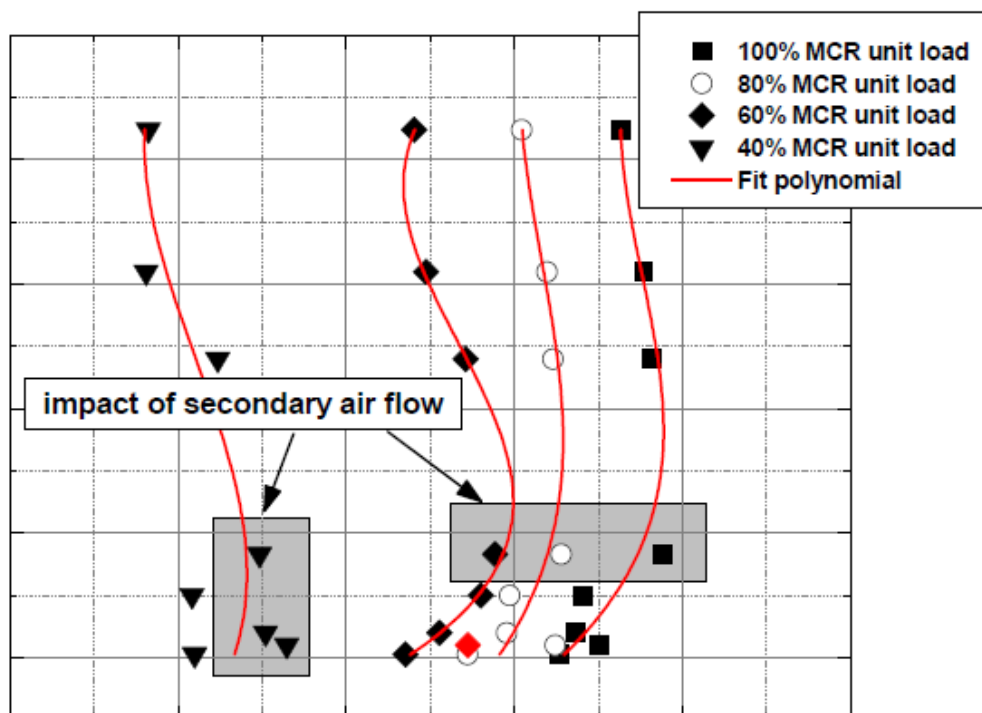
*Obrázek 5.7 - Řešení vstřikování reagentu u CFB 300 MWe před retrofitem [15]*



*Obrázek 5.8 - Řešení vstřikování reagentu u CFB 300 MWe po retrofitu [15]*



Trochu jiná situace je u CFB kotlů typu Pyroflow Compact. Na obrázku obr. Obrázek 5.9 jsou uvedeny typické průběhy teplot pro výšce spalovací komory o kotlů Pyroflow Compact. Skutečně naměřené hodnoty z měření realizovaného v prosinci 2015 nebyly uvolněny k publikování. Tyto průběhy se vztahují ke kotli obdobné (příbuzné) konstrukce.

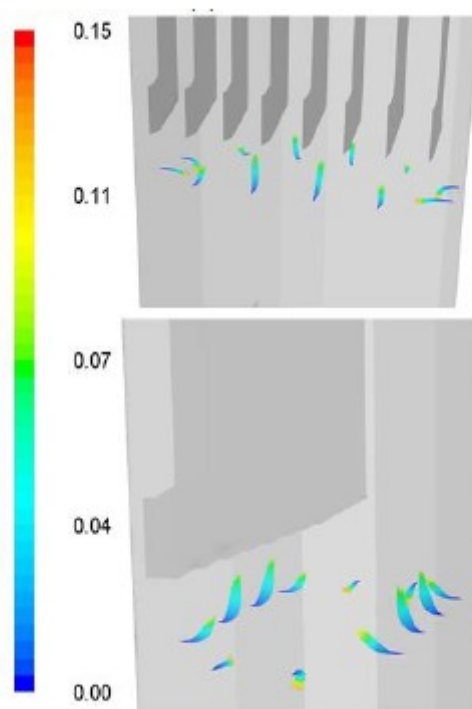


*Obrázek 5.9 - Průběh teplot na CFB kotli FW [16]*

Z výše uvedené analýzy a z měření kotle vyplývá, že dávkovací místa bude nutné navrhnout pro předmětný CFB kotel jak do prostoru separátoru, tak i do prostoru spalovací komory. Z hlediska cyklónu jsem zvolil toto umístění trysek:

- 2 ks trysek do obou bočních stěn separátoru do středu stěny v prostoru pod wortexem
- 8 ks trysek pod přehřívákem PII

Volba rozmístění trysek SNCR ve spalovací komoře vychází z rozmístění (roztečí) trysek SNCR na kotlích společnosti Valmet a s přihlédnutím k CFD modelování kotlů podobné konstrukce s tím. Detail uvažovaného rozmístění je patrný z přiloženého modelu CFB kotle.



***Obrázek 5.10 - Rozmístění trysek ve spalovací komoře CFB kotle [17]***

Navrhované rozmístění trysek je patrné z obrázku obr. 5.10 a v příloze diplomové práce. V místech vstříků se nachází příslušné okno pro aplikaci SNCR.

## 5.5 Objemy spalín

V níže uvedené tabulce tab. 5.4 jsou uvedeny rozbor paliva odebraného v rámci zkoušek fluidního kotle.

Tabulka 5-4 –Kvalitativní znaky spalovaného paliva

Výkon (t/h)	den	$\underline{W}_r$ (%)	$A^d$ (%)	$\underline{Q}_r$ (MJ/kg)	$\underline{S}^d$ (%)	$C^d$ (%)	$\underline{H}^d$ (%)	$\underline{N}^d$ (%)	$O^d$ (%)
75	2	23,38	8,69	18,743	1,5	66,898	5,166	1,006	16,308
		28,4	8,85	18,676	1,24	66,925	5,198	1,011	16,275
130	3	28,18	8,38	18,09	1,33	67,411	5,248	1,02	16,203
		27,18	8,24	19,016	1,22	67,598	5,275	0,986	16,304
188,5	4	28,12	7,53	19,039	1,19	68,028	5,315	1,013	16,415
		28,3	7,52	18,849	1,25	67,718	5,317	0,992	16,667
188,5	5	28,33	6,95	19,0605	1,18	68,194	5,352	0,96	16,889
		28,66	8,03	18,736	1,47	67,08	5,29	0,934	16,751
Průměr		27,56875	8,02375	18,77619	1,2975	67,4815	5,270125	0,99025	16,4765

Pro tyto kvalitativní znaky je proveden výpočet objemů spalín pro maximální výkon.

### 5.5.1 Teoretické množství vzduchu

Přepočít ze sušiny na hrubý prvkový rozbor

Přepočít mezi stavem **r – d** :  $X^r = X^d \cdot (1 - w^r)$  :

$$S^r = S^d \cdot (1 - w^r)$$

$$S^r = 0,012975 \cdot (1 - 0,2756875)$$

$$S^r = 0,009397955$$

$$C^r = C^d \cdot (1 - w^r)$$

$$C^r = 0,674815 \cdot (1 - 0,2756875)$$

$$\underline{C}^r = 0,48877694$$

$$H^r = H^d \cdot (1 - w^r)$$

$$H^r = 0,05270125 \cdot (1 - 0,2756875)$$

$$\underline{H^r = 0,038172174}$$

$$N^r = N^d \cdot (1 - w^r)$$

$$N^r = 0,0099025 \cdot (1 - 0,2756875)$$

$$\underline{N^r = 0,007172505}$$

$$O^r = O^d \cdot (1 - w^r)$$

$$O^r = 0,164765 \cdot (1 - 0,2756875)$$

$$\underline{O^r = 0,119341349}$$

Minimální spotřeba kyslíku (při součiniteli přebytku vzduchu  $\lambda = 1$ ):

$$v_{O_2t} = 22,39 \left( \frac{C^r}{12,00} + \frac{H_2^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O_2^r}{32,0} \right)$$

$$v_{O_2t} = 22,39 \left( \frac{0,48877694}{12,00} + \frac{0,038172174}{4,032} + \frac{0,009397955}{32,06} - \frac{0,119341349}{32,0} \right)$$

$$v_{O_2t} = 1,047010943$$

Minimální spotřeba suchého vzduchu:

$$V_{vz\ st} = \frac{v_{O_2t}}{0,21}$$

$$V_{vz\ st} = \frac{1,047010943}{0,21}$$

$$V_{vz\ st} = 4,985766394$$

Minimální spotřeba vlhkého vzduchu pro  $t_{vz} = 20\ ^\circ\text{C}$  a a relativní vlhkost  $\phi = 0,7$ ,  
objem vodních par ve vzduchu

$$\omega = \varphi \frac{p''}{p_c - \varphi \cdot p''}$$

$$\omega = 0,7 \frac{2,3 \cdot 10^3}{100 \cdot 10^3 - 0,7 \cdot 2,3 \cdot 10^3}$$

$$\omega = 0,01636345157 [m_n^3/m_n^3]$$

$$V_{vz\ vt} = V_{vz\ st} \cdot (1 + \omega)$$

$$V_{vz\ vt} = 4,985766394 \cdot (1 + 0,01636345157)$$

$$V_{vz\ vt} = 4,904182047 [m_n^3/kg]$$

$$v = 1 + \frac{\varphi \cdot p''}{p_c - \varphi \cdot p''}$$

$$v = 1 + \frac{0,7 \cdot 2,3 \cdot 10^3}{100 \cdot 10^3 - 0,7 \cdot 2,3 \cdot 10^3}$$

$$v = 1,01636345157$$

Objem suchého spalovací vzduchu při obsahu kyslíku ve spalínách  $O_2 = 6\%$  (výpočet emisí)

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_2}$$

$$\lambda = \frac{21}{21 - 6}$$

$$\lambda = 1,4$$

$$V_{vz\ s} = \lambda \cdot V_{vz\ st}$$

$$V_{vz\ s} = 1,4 \cdot 4,985766394$$

$$V_{vz\ s} = 6,980072951 [m_n^3/kg]$$

Všechny uvedené objemy vzduchu jsou staženy na 1 [kg] spalovaného paliva a jsou platné při normálním stavu, tj. při 101,3 kPa a 0°C

### 5.5.2 Stechiometrické objemy vzniklých spalín při spálení 1 [kg] paliva

Množství a složení suchých spalín při  $\lambda = 1$

$$V_{sn\ st} = \frac{22,27}{12,011} \cdot C^r + 0,003 \cdot V_{vz\ st} + \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r + \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r + 0,7805 \cdot V_{vz\ st} + 0,0093 \cdot V_{vz\ st}$$

$$V_{sn\ st} = 0,921215101 + 0,006416757 + 3,897125398 + 0,046367627$$

$$V_{sn\ st} = 4,871124883 [m_n^3/kg]$$

$$V_{sn\ CO_2} = \frac{22,27}{12,011} \cdot C^r + 0,003 \cdot V_{vz\ st}$$

$$V_{sn\ CO_2} = \frac{22,27}{12,011} \cdot 0,48877694 + 0,003 \cdot 4,985766394$$

$$V_{sn\ CO_2} = 0,921215101 [m_n^3/kg]$$

$$V_{sn\ SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r$$

$$V_{sn\ SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,009397955$$

$$V_{sn\ SO_2} = 0,006416757 [m_n^3/kg]$$

$$V_{sn\ N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r + 0,7805 \cdot V_{vz\ st}$$

$$V_{sn\ N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,007172505 + 0,7805 \cdot 4,985766394$$

$$V_{sn\ N_2} = 3,897125398 [m_n^3/kg]$$

$$V_{sn\ Ar} = 0,0093 \cdot V_{vz\ st}$$

$$V_{sn\ Ar} = 0,0093 \cdot 4,985766394$$

$$V_{sn\ Ar} = 0,046367627 \text{ [m}_n^3/\text{kg]}$$

### 5.5.3 Objem vodní páry ve spalínách

$$V_{sn\ H_2O_t} = \frac{44,81}{4,032} \cdot H_2^r + \frac{22,41}{18,015} \cdot W^r + (v - 1) \cdot V_{vz\ st}$$

$$V_{sn\ H_2O_t} = \frac{44,81}{4,032} \cdot 0,038172174 + \frac{22,41}{18,015} \cdot 27,56875 + (1,01636345157 - 1) \cdot 4,985766394$$

$$V_{sn\ H_2O_t} = 34,80032927 \text{ [m}_n^3/\text{kg]}$$

### 5.5.4 Teoretické množství vlhkých spalín

$$V_{sn\ vt} = V_{sn\ st} + V_{sn\ H_2O_t}$$

$$V_{sn\ vt} = 4,871124883 + 34,80032927$$

$$V_{sn\ vt} = 39,67145415 \text{ [m}_n^3/\text{kg]}$$

### 5.5.5 Množství spalín

Z měření kotle K5 ve 12/2015 byly naměřeny tyto účinnosti uvedené v tab. 5.4.

**Tabulka 5-4 – Naměřené a vypočtené účinnosti fluidního kotel K5 podle DIN 1942-94**

Výkon kotle	40 % MCR	70 % MCR	100 % MCR
Účinnost (%)	91,61	92,81	93,04
Množství páry (kg/s)	21,1	36,3	52,3

Tlak páry (bar)	134	134	134
Teplota páry (°C)	523	535	537
Teplota napájecí vody (°C)	166,6	163	157,1
Teplota v bubnu	334	335,5	337,6
Odluh (kg/s)	0,26	0,26	0,26

### 5.1.1 Výrobní teplo páry, množství paliva a celkové množství vzniklých spalin

Výpočet tepla v páře:

$$Q_p = M_p \cdot i_p = 52,3 \cdot 3\,437$$

$$Q_p = 179\,755,1 \text{ [kW]}$$

Výpočet tepla v odluhu:

$$Q_o = M_o \cdot c_v \cdot T_o = 0,26 \cdot 4,18 \cdot 337$$

$$Q_o = 366,2516 \text{ [kW]}$$

Výpočet tepla v napájecí vodě:

$$Q_{NV} = M_{NV} \cdot c_v \cdot T_{NV} = 52,56 \cdot 4,18 \cdot 157,1$$

$$Q_{NV} = 34\,514,99568 \text{ [kW]}$$

Výpočet vyrobeného tepla:

$$Q_v = Q_p + Q_o - Q_{NV} = 179\,755,1 + 366,2516 - 34\,514,99568$$



$$Q_V = 145\,606,3559 \text{ [kW]}$$

Výpočet dodaného tepla v palivu:

$$Q_{PAL} = \frac{Q_V}{\eta} = \frac{145\,606,3559}{0,9304}$$

$$Q_{PAL} = 156\,498,6629 \text{ [kW]}$$

Výpočet množství paliva:

$$M_{PAL} = \frac{Q_{PAL}}{Q_i^r} = \frac{156\,498,6629}{18\,776,19}$$

$$M_{PAL} = 8,335 \text{ [kg/s]}$$

Výpočet celkového množství spalín:

$$V_{Csnvt} = V_{snvt} \cdot M_{PAL} = 39,67145415 \cdot 8,335$$

$$V_{Csnvt} = 330,6597094 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

## 5.6 Skladování čpavkové vody

V rámci diplomové práce bylo nutné navrhnout velikost zásobní kapacity čpavkové vody na teplárně. Pro skladování čpavkové vody jsem navrhnul po konzultaci s provozovatelem dvě zásobní nádrže o kapacitě každé z nich 45 m<sup>3</sup>. Tato skladovací kapacita by měla vystačit na cca 10 dní provozu při odhadované potřebě čpavkové vody 150 kg/h. Jelikož se v rámci diplomové práce nepodařilo získat PTCH čpavkové vody volím jako materiál nádrží nerezový plech. Rozdělení skladovacích kapacit na dvě nádrže má tyto funkce:

- snížení velikosti jímky na ½
- umožnění vnitřní revize jednoho zásobníku v průběhu roku
- zajištění vysoké spolehlivosti systému

Dopravu čpavkové vody do prostoru kotelny budou zabezpečovat dvě čerpadla. Parametry čerpadla jsou v tab. 5.5. Čerpadla byly proporcionálně zvoleny vzhledem k objemu spalín uvedeném v kap. 5.5.5 a podobným aplikacím v Polsku a ČR.

**Tabulka 5.5 – Dopravní čerpadla čpavkové vody**

Typ	H7NX6PEB40200MCU
Výrobce	Liquiflo
Dopravní výška	11 bar
Množství dopravované čpavkové vody	30 – 430 l/h
Příkon motoru	1,1 kW

Jako stáčecí čerpadlo je zvoleno čerpadlo Grundfos CRN 32-1.

Typ	CRN 32-1
Výrobce	Grundfos
Dopravní výška	12,5 m
Množství dopravované čpavkové vody	33,5 m <sup>3</sup> /h
Příkon motoru	1,75 kW

Ze základních rozměrových dispozic a s přihlédnutím k velikostem čpavkových hospodářství změřených v rámci referenčních návštěv jsem navrhl umístění nádrží na pozici u dílny údržby. Dispoziční situování je patrné z přílohy č.1. diplomové práce. Hospodářství čpavkové vody je navrženo tak, že cisterna zastaví zadní částí na stáčecím místě, které bude mít statut havarijního stáčiště. V těsné blízkosti stáčiště bude umístěn podzemní havarijní zásobník o objemu cisterny. Vpusť do tohoto zásobníku bude otevřena těsně před zahájením stáčení čpavkové vody do zásobníků.

Vlastní prostor skladovacích nádrží bude obezděn a vytvoří tak společně s izolovaným dnem havarijní nádrž pro 50 % skladované čpavkové vody. Uvnitř záchytné vany budou umístěny stáčecí a dopravní čerpadla. Čerpadla budou umístěna na vyvýšených betonových soklech. Dno záchytné nádrže bude vybaveno signalizací zaplavení. Součástí výstroje nádrží bude měření teploty skladované čpavkové vody, hladiny v nádrži atd. V prostoru nad nádržemi se předpokládá detekce úniku čpavkové vody. Schéma zapojení čpavkového hospodářství je na PI diagramech uvedených v příloze č.2. Systém je doplněn o odvod par z nádrží do cisterny pomocí atestovaných speciálních gumových hadic. S požárním zabezpečením například pomocí skrápěcího systému se neuvažuje. Veškeré potrubní díla a armatury budou v nerezovém provedení. 3D model stáčecího místa v AUTOCAD Inventor je v příloze č.3. Záchytná vana je dimenzována na objem jedné z nádrží. V těsné blízkosti nádrží bude vybudován septik pro odvod čpavkové vody ze stáčiště v případě netěsnosti cisterny nebo v případě netěsnosti na stáčecím systému.

## **5.6 Potrubní trasy čpavkové vody do kotelny a vstříkovací moduly**

Pro vedení potrubní trasy budou využity stávající potrubní mosty a ocelové konstrukce kotle. Trasa se předpokládá v dimenzi DN 25 Stejně jako v případě skladování čpavkové vody budou potrubní trasy z nerez. K jednotlivým modulům bude přiveden tlakový vzduch o potřebných parametrech. Stávající kompresorová stanice má dostatečnou výkonovou kapacitu, rovněž hlavní páteřní rozvody tlakového vzduchu jsou potřebně dimenzovány. Standardně jsou moduly vyráběny o rozměrech 264 x 1100. 8 modulů bude umístěno na plošině na podlaží 16 m a dva moduly pak na plošině na výškové úrovni 28 m. K těmto modulům bude přivedena čpavková vody pomocí horizontálních a svislých rozvodů.

## **5.7 Řídicí systém**

Pro řízení technologie SNCR bude použit stávající řídicí systém Damatic XDi společnosti Valmet. Potřebná polní instrumentace bude připojena na nové I/O karty. Dávkování bude řízeno automatickým přepojováním vstříkovacích kopí mezi separátorem na výškové kótě + 28 m a vstříky pod přehřívákem PII.

## **5.7 Návrh kopí a ochrana prostupů kopí do prostoru spalovací komory**

Vzhledem k šířce praporků mezi výparníkovými trubkami, která je 24 mm, nebude nutné při realizaci vstříkovacích míst zhotovovat výhyby. Prostup se realizuje provrtáním

praporku. Na neotápěnou stěnu tlakového celku pak bude přivařena ochranná trubka kopí. Tato ochranná trubka umožňuje:

- nastavení délky zasunutí kopí
- utěsnění spalovací komory po vytažení kopí
- správné vedení kopí

V rámci realizace bude nutné zajistit ochranu tlakového celku před korozí a abrazí. Sestupné proudy popílku z horní části spalovací komory směrem do fluidního lože v kombinaci s nástřikem čpavkové vody by mohly způsobit nevhodné lokální usměrnění proudění popílku, které by pak způsobilo zeslabení tloušťky stěny trubky výparníku. Návrh prostupu MeS a držák kopí je navržen v příloze č. 4 diplomové práce.

## 6. Závěr

V rámci své diplomové práce jsem se zabýval problematikou návrhu technologie SNCR pro fluidní kotel K5 v Teplárně Olomouc. V rámci své práce se mi podařilo získat celou řadu teoretických a praktických poznatků vztahující se k:

- provozování fluidní technologie
- navrhování technologických uzlů
- projektování pomocí CAD technologií

Samozřejmě není možné opomenout ani získání základního legislativního přehledu týkajícího se provozování velkých teplárenských zdrojů.

Vlastní diplomová práce byla rozdělena do dvou částí a to teoretické části spojené s rešerší dostupné literatury a do praktické části, která byla založena na několikadenním měření fluidního kotle v listopadu a prosinci 2015 a dále na projekční část, která byla realizována v následujícím období.

V rámci diplomové práce bylo dosaženo vytýčených cílů a byl zpracován návrh technologie SNCR pro fluidní kotel K5 na úrovni prefeasibility study.

## Literatura

- 1 Firemní materiály společnosti Mehldau & STEINFATH
- 2 Bernd von der Heide. Pokročilá technologie SNCR: Nové možnosti a hranice. In: *KOTLE A ENERGETICKÁ ZAŘÍZENÍ: Brno 19.-21.3.2012*. Brno: AEM, 2012
- 3 Firemní materiály společnosti DUSTEX
- 4 Firemní materiály společnosti LECHLER
- 5 Firemní materiály společnosti Alstom
- 6 VON DER HEIDE, Bernd. New Developments of an Effective SNCR Control System Incorporating the NO<sub>x</sub> Mass Flow Profile [online], 14 [cit. 2016-08-04]. Dostupné z: [http://www.vivis.de/phocadownload/2015\\_wm/2015\\_WM\\_239-252\\_von%20der%20Heide.pdf](http://www.vivis.de/phocadownload/2015_wm/2015_WM_239-252_von%20der%20Heide.pdf)
- 7 Firemní materiály společnosti STRABAG
- 8 Firemní materiály společnosti IBIDEN PORZELLAN FABRIK
- 9 Místní provozní a pracovní předpis kotle K5
- 10 BLEJCHAŘ, Tomáš, Jiří PECHÁČEK a Rostislav Malý. CFD Model SNCR Technologie: Ansys konference 2008. 1. Praha, 2008
- 11 Operating Experience and Latest Developments of Alstom Power's 300 MWe Class Boilers: 10th International Conference on Circulating Fluidized Beds and Fluidization Technology. -: ECI Digital Archives, 2011, 2011.

- 12      BLASZCZUK, Artur, Maciej KOMOROWSKI a Wojciech NOWAK. Distribution of solids concentration and temperature in the combustion chamber of the CS-OTU CFB boiler. *Journal of Power Technologies*. IHE, 2012, 2012(92), 8.
- 13      SHEN, Juan. SNCR Efficiency Study of Optimization of Spray Systems in CFB: ILASS Americas 27 th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. Wheaton, USA, 2015.
- 14      Legislativa v oblasti ochrany ovzduší. Ministerstvo životního prostředí [online]. 2016 [cit. 2016-09-19]. Dostupné z:  
[http://www.mzp.cz/cz/legislativa\\_metodicke\\_pokyny\\_ovzdusi](http://www.mzp.cz/cz/legislativa_metodicke_pokyny_ovzdusi)

## Seznam tabulek

Tabulka	Název tabulky
Tab. 1.1	Současné a budoucí emisní limity fluidního kotle K5 mg/Nm <sup>3</sup>
Tab. 1.2	Průměrné roční emise v mg/Nm <sup>3</sup>
Tab. 4.1	Základní koncepce použití SNCR
Tab. 5.1	Technické parametry fluidního kotle
Tab. 5.2	Minimální na maximální rozsah uvažovaného paliva
Tab. 5.3	Výstupy z měření kotle
Tab. 5.4	Kvalitativní znaky spalovaného paliva
Tab. 5.5	Naměřené a vypočtené účinnosti fluidního kotle K5 podle DIN 1942 – 94
Tab. 5.6	Parametry dopravního čerpadla čpavkové vody
Tab. 5.7	Parametry stáčecího čerpadla



## Seznam obrázků

Obrázek	Název obrázku
Obr.1.1.	Histogram emisí NO <sub>x</sub> kotle K5
Obr.3.1	Mechanismy vzniku NO <sub>x</sub>
Obr.4.1.	Teplotní okno pro technologii SNCR
Obr 4.2	Rozklad reagentů
Obr 4.3	Teplotní pole pro aplikaci čpavkové vody a močoviny
Obr. 4.4	Zjednodušené schéma aplikace SNCR
Obr. 4.5	Detail stáčecího místa čpavkové vody
Obr. 4.6.	Mísicí a směšovací modul
Obr. 4.7	Vstřikovací kopí
Obr. 4.8	Měřicí zařízení
Obr 4.9	Schéma Variojet trysky
Obr. 4.10	Schéma lavalovy trysky
Obr 4.11	Twin – fluid tryska

Obrázek	Název obrázku
Obr. 4.11	Princip měření teploty spalín ve spalovací komoře pomocí akustického měření teploty AGAM
Obr. 4.13	Adaptive None Catalytic Reduction
Obr. 4.14	Schéma USNCR technologie společnosti Alstom
Obr. 4.15	Možnosti aplikace USNCR pro rozměrnější ohniště
Obr. 4.16	Detail výsuvného chlazeného kopí technologie USNCR
Obr. 4.47	Koncepční řešení slip killeru
Obr 4.18	SNCR s nástřikem chladicí vody
Obr 4.19	Způsob řízení SNCR s nástřikem chladicí vody
Obr 4.20	Způsob řízení SNCR s nástřikem chladicí vody
Obr 4.21	Průběh emisí NO <sub>x</sub> po retrofitu technologie SNCR
Obr. 4.22	Průběh chemických reakcí při SCR
Obr. 4.23	Průběh chemických dějů na katalyzátoru
Obr 4.24	Vysokoprašný systém HIGH DUST

Obrázek	Název obrázku
Obr. 4.25	Nízkoprašný systém SCR
Obr 4.26	Uspořádání SCR za odsířením – TAIL END
Obr. 4.27	Konstrukční provedení katalyzátorů
Obr 4.28	AIG mříž a mixér
Obr. 4.29	Detail funkce mixéru
Obr. 4.30	Kanálové vestavby pro zrovnoměnění průtoku spalin
Obr. 4.31	Pohled na horní část katalytické vrstvy – detail jednotlivých modulů
Obr. 4.32	Detail kanálu spalin s umístěným katalyzátorem
Obr. 4.33	Detail výstupní části katalyzátoru
Obr 4.34	Detail konstrukčního řešení katalyzátoru
Obr 4.35	Normální provoz katalyzátoru a mechanismus vzniku ucpání katalyzátoru
Obr 4.36	Uzavírání katalyzátoru (např. od nánosů MgO)
Obr 4.37	Uzavírání katalyzátoru od aglomerovaných popílků – popcorn efekt

Obrázek	Název obrázku
Obr. 4.28	Management katalyzátorů
Obr 5.1	Řez kotlem
Obr 5.2	Princip fluidního kotle K5 – princip cirkulace
Obr. 5.3	Detail z měření teplotního pole a emisí
Obr 5.4	Detail z měření tlaku po výšce spalovací komory
Obr. 5.5	Reakční rovnice čpavkové vody a močoviny
Obr. 5.6	Schéma fluidního kotle společnosti Alstom s instalovaným kopím
Obr. 5.7	Řešení vstřikování reagentu u CFB 300 MWe před retrofitem
Obr. 5.8	Řešení vstřikování reagentu u CFB kotle 300 MWe po retrofitu
Obr. 5.9	Průběh teploty u kotle FW
Obr. 5.10	Rozmístění trysek ve spalovací komoře CFB kotle

## **Zkratky**

Zkratka	Význam zkratky
OKD	Ostravsko-karvinské doly
CZT	Centralizované zásobování teplem
SCR	Selektivní katalytická redukce
SNCR	Selektivní nekatalytická redukce
CFD	Computer fluid dynamics
MCR	Výkon kotle
PTCH	Požární technické charakteristiky

## **Přílohy diplomové práce**

Obrázek	Název obrázku
1	Situace umístění technologie SNCR
2	PI diagramy technologie
3	3D model skladu
4	Držák kopí a řešení prostupu MeS
5	Rozmístění kopí